



[12] 发明专利申请公开说明书

[21] 申请号 00818161.6

[43] 公开日 2003 年 4 月 30 日

[11] 公开号 CN 1415083A

[22] 申请日 2000.12.21 [21] 申请号 00818161.6

[30] 优先权

[32] 2000. 1. 4 [33] US [31] 09/477,267

[86] 国际申请 PCT/US00/34982 2000.12.21

[87] 国际公布 WO01/50201 英 2001.7.12

[85] 进入国家阶段日期 2002.7.3

[71] 申请人 UT - 巴特勒有限责任公司

地址 美国田纳西

[72] 发明人 克拉伦斯·E·托马斯

格里高利·R·哈森

[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

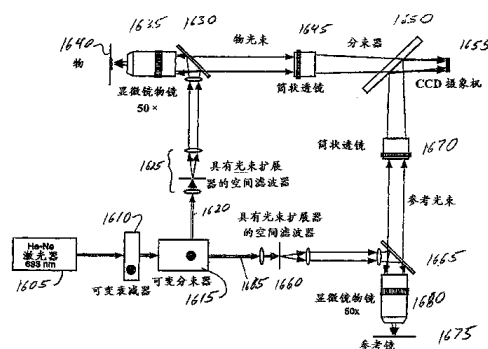
代理人 李 强

权利要求书 7 页 说明书 28 页 附图 22 页

[54] 发明名称 直接至数字的全息摄影和全息电视的采集和回放系统的改进

[57] 摘要

描述一种用于直接至数字全息摄影和全息电视的采集和回放系统。一种记录一个轴外全息图的方法包括：将一个激光束分离为一个物光束(1620)和一个参考光束(1685)；使所述参考光束从一个参考光束镜面(1675)反射出来；使所述物光束从一个照明分束器(1630)反射出来；使所述物光束通过一个物镜透镜(1635)；使所述物光束从一个物体(1640)反射出来；将所述参考光束和所述物光束聚焦于数字记录器(1655)的焦平面以便形成一个轴外全息图；将轴外全息图数字地记录和进行付里叶变换。一种写入一个轴外全息图的方法包括：使一个激光束(1950)通过一个空间光调制器(1975)；及将激光束聚焦于一个光折射晶体(1995)的焦平面处以便加上一个全息图。一种用于回放轴外全息图的方法包括：使用回放光束(1915)照明一个具有全息图的光折射晶体。



1.一种用于记录一个轴外全息图的设备，包括：
一个激光器；
一个在光学上耦合至所述激光器的照明分束器；
一个在光学上耦合至所述照明分束器的物镜透镜；
一个在光学上耦合至所述物镜透镜的物；
一个耦合至所述激光器的参考分束器；
一个在光学上耦合至所述参考分束器的参考镜面；
一个在光学上耦合至所述参考分束器和所述照明分束器的光束合并器；及

一个在光学上耦合至所述光束合并器的数字记录器，

其中一个参考光束和一个物光束在所述数字记录器的焦平面处被合并以便形成一个轴外全息图，以及所述物光束和所述参考光束组成多个基本上同时的参考和物光波。

2.权利要求1的设备，其中所述照明分束器、所述物镜透镜、所述物、所述参考分束器、所述参考镜面、所述光束合并器和所述数字记录器定义一个 Mach-Zender 光学几何。

3.权利要求1的设备，其中来自所述物的物光束被所述照明分束器的前表面反射以及来自所述参考镜面的参考光束被所述参考分束器的前表面反射。

4.权利要求1的设备，其中所述照明分束器包括一个偏振照明分束器以及所述参考分束器包括一个偏振参考分束器，及

还包括，一个在光学上耦合于所述偏振照明分束器与所述物之间的照明四分之一波板；及一个在光学上耦合于所述偏振参考分束器与所述参考镜面之间的参考四分之一波板。

5.权利要求1的设备，还包括一个在光学上耦合于所述照明分束器与所述光束合并器之间的第一偏振器；及一个在光学上耦合于所述参考分束器与所述光束合并器之间的第二偏振器。

6.权利要求 1 的设备, 其中物光束路径基本上与参考光束路径相同。

7.权利要求 1 的设备, 还包括一个在光学上耦合于所述激光器与所述照明分束器和所述参考分束器两者之间的声光调制器。

8.权利要求 1 的设备, 还包括一个在光学上耦合于所述激光器与所述照明分束器之间的第一声光调制器及一个在光学上耦合于所述激光器与所述参考分束器之间的第二声光调制器。

9.权利要求 1 的设备, 还包括一个在光学上耦合于所述激光器与所述照明分束器之间的第一光纤及一个在光学上耦合于所述激光器与所述参考分束器之间的第二光纤。

10.权利要求 9 的设备, 其中所述第一光纤包括一个第一单模式偏振保持光纤及所述第二光纤包括一个第二单模式偏振保持光纤。

11.权利要求 1 的设备, 还包括一个在光学上耦合于所述照明分束器与所述光束合并器之间的第一筒状透镜及一个在光学上耦合于所述参考分束器与所述光束合并器之间的第二筒状透镜。

12.权利要求 1 的设备, 还包括一个在光学上耦合于所述激光器与所述照明分束器之间的第一光束扩展器/空间滤波器及一个在光学上耦合于所述激光器与所述参考分束器之间的第二光束扩展器/空间滤波器。

13.一种用于记录一个轴外全息图的方法, 包括:

将一个激光束分离为一个物光束和一个参考光束;

使所述参考光束从一个参考光束镜面反射出来;

使所述物光束从一个照明分束器反射出来;

使所述物光束通过一个物镜;

使所述物光束从一个物反射出来;

将所述参考光束和所述物光束聚焦于一个数字记录器的焦平面以便形成一个轴外全息图;

数字地记录所述轴外全息图; 及

根据付里叶变换对所述轴外全息图进行变换以便获得一组结果。

14.权利要求 13 的方法,还包括在数字地记录之前使用一个光束合并器将所述物光束与所述参考光束合并。

15.权利要求 13 的方法,其中(i)使所述物光束从所述照明分束器反射出来的步骤包括在从所述物反射所述物光束之后从所述照明分束器的前表面反射所述物光束及(ii)使所述参考光束从所述参考分束器反射出来的步骤包括在从所述参考镜面反射所述参考光束之后从所述参考反射器的前表面反射所述参考光束。

16.权利要求 13 的方法,其中(i)使所述物光束从所述照明分束器反射出来的步骤包括从一个偏振照明分束器反射所述物光束及(ii)使所述参考光束从所述参考分束器反射出来的步骤包括从一个偏振参考分束器反射所述参考光束,及

还包括(a)在将所述物光束从所述物反射出来之前和之后都使所述物光束通过一个照明四分之一波板及(b)在将所述参考光束从所述参考镜面反射出来之前和之后都使所述参考光束通过一个参考四分之一波板。

17.权利要求 14 的方法,还包括:

在将所述物光束从所述照明分束器反射出来之后及在使用所述光束合并器将所述物光束和所述参考光束合并之前都使所述物光束通过一个第一偏振器;及

在将所述参考光束从所述参考分束器反射出来之后及在使用所述光束合并器将所述物光束和所述参考光束合并之前都使所述参考光束通过一个第二偏振器。

18.权利要求 13 的方法,其中由所述物光束所描绘的物光束路径基本上与由所述参考光束所描绘的参考光束路径相同。

19.权利要求 13 的方法,还包括在将所述激光束分离之前使所述激光束通过一个声光调制器。

20.权利要求 13 的方法,还包括:

在使用所述照明分束器将所述物光束反射之前使所述物光束通过第一声光调制器;及

在使用所述参考分束器将所述参考光束反射之前使所述参考光束通过第二声光调制器。

21.权利要求 13 的方法, 还包括:

在使用所述照明分束器将所述物光束反射之前使所述物光束通过第一光纤; 及

在使用所述参考分束器将所述参考光束反射之前使所述参考光束通过第二光纤。

22.权利要求 13 的方法, 还包括:

在从所述照明分束器将所述物光束反射之后使所述物光束通过第一筒状透镜; 及

在从所述参考分束器将所述参考光束反射之后使所述物光束通过第二筒状透镜。

23.权利要求 13 的方法, 还包括:

在用所述照明分束器将所述物光束反射之前使所述物光束通过第一光束扩展器/空间滤波器; 及

在使用所述参考分束器将所述参考光束反射之前使所述参考光束通过第二光束扩展器/空间滤波器。

24.权利要求 13 的方法, 还包括将所述轴外全息图存储为数字数据。

25.权利要求 13 的方法, 还包括回放所述轴外全息图。

26.权利要求 13 的方法, 还包括传输所述轴外全息图。

27.一个由权利要求 13 的方法所准备的轴外全息图。

28.权利要求 27 的轴外全息图, 其中所述轴外全息图是使用扩展付里叶变换所生成的。

29.一种用于写入一个轴外全息图的设备, 包括:

一个激光器;

一个在光学上耦合至所述激光器的空间光调制器;

一个在光学上耦合至所述空间光调制器的透镜;

及一个在光学上耦合至所述透镜的光折射晶体,

其中一个写光束被所述透镜聚焦于所述光折射晶体的一个焦平面处以便将一个全息衍射光栅图案加于所述光折射晶体上。

30.权利要求 29 的设备,其中所述轴外全息图能够根据通过使用一个回放光束以非正交角度将所述全息图光栅照明而加于所述光折射晶体上的所述全息衍射光栅图案而进行回放。

31.权利要求 29 的设备,其中所述轴外全息图能够根据所述全息衍射光栅图案以非正交角度进行回放,所述全息衍射光栅图案是通过使实际上所有所述写光束通过所述空间光调制器和使用所述写光束将所述全息衍射光栅图案进行照明而加于所述光折射晶体上的。

32.权利要求 29 的设备,还包括:

一个在光学上耦合于所述空间光调制器与所述光折射晶体之间的零衍射阶孔径。

33.权利要求 29 的设备,还包括一个在光学上耦合于所述激光器与所述空间光调制器之间的声光调制器。

34.权利要求 29 的设备,还包括一个在光学上耦合于所述激光器与所述空间光调制器之间的分束器及一个在光学上耦合至所述分束器的回放镜面;及一个在光学上耦合至所述回放镜面和所述空间光调制器的光束合并器。

35.权利要求 29 的设备,还包括一个在光学上耦合于所述激光器与所述空间光调制器之间的光纤。

36.权利要求 35 的设备,其中所述光纤包括一个第一单模式偏振保持光纤。

37.权利要求 29 的设备,其中所述空间光调制器选自包含反射液晶显示器、透射液晶显示器和微镜面在内的组中。

38.权利要求 29 的设备,其中所述空间光调制器包括一个液晶显示器,及还包括一个在光学上耦合于所述空间光调制器与所述光束合并器之间的线性偏振器。

39.一种写入一个轴外全息图的方法,包括:

使一个写光束通过一个空间光调制器;及

将所述写光束聚焦于一个光折射晶体的焦平面处以便将一个全息衍射光栅图案加于所述光折射晶体上。

40.权利要求 39 的方法,还包括通过关闭一个写光束快门和使用一个回放光束以非正交角度照明所述全息光栅而根据加于所述光折射晶体上的所述全息衍射光栅图案对所述轴外全息图进行回放。

41.权利要求 39 的方法,还包括根据所述全息衍射光栅图案而以非正交角度回放所述轴外全息图,所述全息衍射光栅图案是通过将实际上所有所述写光束通过所述空间光调制器和使用所述写光束将所述全息摄影光栅进行照明而加于所述光折射晶体上的。

42.权利要求 39 的方法,还包括:

使所述写光束通过一个在光学上耦合于所述空间光调制器与所述光折射晶体之间的筒状透镜;

使所述写光束通过一个在光学上耦合于所述筒状透镜与所述光折射晶体之间的零衍射阶孔径;及

使所述写光束通过一个在光学上耦合于所述零衍射阶孔径与所述光折射晶体之间的物透镜。

43.权利要求 39 的方法,还包括使所述激光束通过一个在光学上耦合于所述激光器与所述光折射晶体之间的声光调制器。

44.权利要求 40 的方法,还包括使所述写光束通过一个在光学上耦合于所述激光器与所述空间光调制器之间的第一声光调制器及使所述回放光束通过一个在光学上耦合于所述激光器与所述光折射晶体之间的第二声光调制器。

45.权利要求 39 的方法,还包括使所述写光束通过一个在光学上耦合至所述空间光调制器的第一光纤。

46.一种用于回放一个轴外全息图的设备,包括:

一个激光器;及

一个在光学上耦合至所述激光器的光折射晶体。

47.权利要求 46 的设备,还包括:

在光学上耦合至所述光折射晶体的观看光学系统。

48.权利要求 46 的设备,其中所述轴外全息图是使用一个回放光束照明所述光折射晶体而以非正交角度进行回放的。

49.权利要求 46 的设备,其中所述轴外全息图是使用一个回放光束以非正交角度照明所述光折射晶体而进行回放的。

50.一种用于回放一个轴外全息图的方法,包括:使用一个回放光束将一个具有全息摄影衍射光栅的光折射晶体加以照明。

51.权利要求 50 的方法,其中所述轴外全息图是使用一个回放光束以正交角度照明所述光折射晶体而以非正交角度进行回放的。

52.权利要求 50 的方法,其中所述轴外全息图是使用一个回放光束以非正交角度照明所述光折射晶体而以正交角度进行回放的。

直接至数字的全息摄影和 全息电视的采集和回放系统的改进

与相关申请的相互引用

本申请是于 1997 年 6 月 11 日递交而现在未决的共同未决美国系列号 08/873,252 的 35 U. S. C. §120 的部分继续申请, 该申请在此被全文引用。

作为联邦资助研究和开发下的发明权利声明

本发明是按照政府支持的美国能源部给予 Lockheed Martin Energy Research Corporation 的合同号 DE-AC05-96OR22464 执行的, 及政府对此发明具有一定权利。

发明背景

1. 发明领域

本发明一般涉及全息摄影领域。更具体地, 本发明涉及一种直接至数字 (即无胶片, 无底板) 的全息图采集和回放系统。在本发明优选实施例中, 全息图采集是基于电荷耦合设备 (CCD) 摄象机。本发明因此涉及一种全息摄影系统。

2. 相关技术的讨论

传统全息摄影方法使用胶片或全息摄影底板 (具有一层适用于全息摄影的照相乳剂的玻璃板)。⁽¹⁾ 在模拟方法中, 只有使用激光器 (或某些情况下使用白光) 和原始记录的全息图或它的复制品才能进行回放。这些模拟方法慢、烦琐和昂贵。⁽⁴⁾ 而且没有办法将它们压缩为能够在另一个场所传送和回放的电子信号。必须始终发送硬拷贝。更坏的是, 处理胶片的时间延迟使全息摄影及其变动方案在许多场合下无

法使用。即使能够忍受传统全息摄影系统本身的费用，但由于必须处理胶片而造成的时间延迟和低产量使由于延迟所增加的费用绝对无法忍受(例如车胎制造商无法等待45分钟或即使只2分钟来了解哪一个具体车胎中有裂痕)。

参照图1，其中显示一个传统边带全息摄影系统的光学几何。⁽²⁻³⁾来自激光器110的光束由光束扩展器120加以扩展。在通过透镜130之后，该光束被分束器140分离为两部分。分束器140可以是例如90%反射性的。组成物光束150的反射光束射向镜面160并且被它反射。物光束150然后射向一个物体170。该物光束150然后入射于一个全息底板190上。

与此同时，来自透镜130的穿过分束器140的那部分光束组成一个参考光束180，它射向镜面200并且被它反射。反射的参考光束然后入射于一个全息底板190上。

近年以来，开发了全息摄影干涉量度学，尽管它还是一个模拟方法⁽⁵⁾。这包括聚焦全息摄影的开发。⁽⁶⁻⁷⁾

在此申请中已经参考了几篇文献，它们被使用阿拉伯数字包括于上标处的括号内。这些和其他文献的全部引用可以在说明书末尾、紧挨权利要求书之前处找到。所有这些文献的全部公开内容在此处被包括入本申请中，以便标示本发明背景和阐述现有技术状态。

发明概要

因此，特别需要一种方法，用于(1)将全息图直接记录于带有数字计算机界面的CCD(电荷耦合设备)摄象机或任何其他合适的视频摄象机，然后(2)将该全息图存储于一个数字存储媒质上(例如RAM、硬驱、磁带、可记录CD等)。一种用于实施此方法的设备的显著特征包括使用参考光束与物光束之间的非常小的角度及将全息图聚焦于图象平面上以便简化图象。此外，本发明包括(1)一种用于在二维显示器上显示全息图相位或幅值的方法，和(2)一种使用光学活性晶体和激光器完全地回放全息图的方法。相反，现有技术不包括对于如

何电子地（数字地）记录光学全息图的描述，而对于回放或播送光学全息图的描述则更少得多。

此处公开的改进允许得到更高质量、更低噪音的数字全息图的采集和回放。这些改进利用几何学和光学部件的变动方案，以便允许采集和分析高分辨率全息图。此外，已经对回放系统作了改进以便允许将一个数字光栅（全息图）写至一个光折射晶体，然后使用单个激光束回放该光栅或全息图。

本发明的一个实施例是基于一种用于记录一个轴外全息图的设备，该设备包括：一个激光器；一个在光学上耦合至所述激光器的照明分束器；一个在光学上耦合至所述照明分束器的物镜透镜；一个在光学上耦合至所述物镜透镜的物体；一个耦合至所述激光器的参考分束器；一个在光学上耦合至所述参考分束器的参考镜面；一个在光学上耦合至所述参考分束器和所述照明分束器两者的光束合并器；及一个在光学上耦合至所述光束合并器的数字记录器，其中一个参考光束和一个物光束在所述数字记录器的焦平面处被合并以便形成一个轴外全息图，以及所述物光束和所述参考光束组成多个实际上同时的参考和物体光波。本发明的另一个实施例是基于一种记录一个轴外全息图的方法，包括：将一个激光束分离为一个物光束和一个参考光束；将所述参考光束从一个参考光束镜面反射出来；将所述物光束从一个照明分束器反射出来；使所述物光束通过一个物镜透镜；将所述物光束从一个物体反射出来；将所述参考光束和所述物光束聚焦于数字记录器的焦平面以便形成一个轴外全息图；数字地记录所述轴外全息图；及根据付里叶变换将所述轴外全息图进行变换以便获得一组结果。

本发明的另一个实施例是基于一种用于写入一个轴外全息图的设备，该设备包括：一个激光器；一个在光学上耦合至所述激光器的空间光调制器；一个在光学上耦合至所述空间光调制器的透镜；及一个在光学上耦合至所述透镜的光折射晶体，其中一个写光束被所述透镜聚焦于所述光折射晶体的焦平面处以便将一个全息摄影衍射光栅图案加于所述光折射晶体上。本发明的另一个实施例是基于一种写入一个

轴外全息图的方法，包括：使一个激光束通过一个空间光调制器；及将所述激光束聚焦于一个光折射晶体的焦平面处以便将一个全息摄影衍射光栅图案加于所述光折射晶体上。

本发明的另一个实施例是基于一个用于回放一个轴外全息图的设备，该设备包括：一个激光器；及一个在光学上耦合至所述激光器的光折射晶体。本发明的用于回放一个轴外全息图的方法的另一个实施例包括：使用一个回放光束将一个具有全息摄影衍射光栅的光折射晶体加以照明。

当结合以下说明和附图考虑本发明时，将能更好地理解本发明的这些和其他方面。然而应该理解，以下用于标示本发明优选实施例及其许多具体细节的说明只是用于阐述而不是限制目的。能够在不背离本发明的实质和范围的情况下作出许多变动和修改，而本发明包括所有这类修改。

附图的简要描述

当参照组成此说明一部分的附图中所阐述的示例性而因此是非限制性的实施例时，将更为明显地了解组成本发明的优点和特征的概念和本发明提供的模型系统的部件和操作，其中相同参考数字标示不同视图中的相同元件。应该注意到，图中阐述的特征不必要按照尺寸画出。

图 1 阐述一个被合适地标以“现有技术”的传统（Leith & Upatnieks）边带全息摄影系统的原理图；

图 2 阐述一个表示本发明实施例的简单直接至数字的全息摄影系统的原理图；

图 3a 阐述一个表示本发明实施例的“Michelson”光学几何直接至数字的全息摄影设置的透视图；

图 3b 阐述图 3A 中所示直接至数字的全息摄影设置的另一个透视图；

图 4 阐述一个表示本发明实施例的镜面中一个涂写的数字地采集

的全息图;

图 5 阐述图 4 的 2-D 付里叶变换的曲线;

图 6 阐述来自图 4 的全息图相位数据的回放;

图 7 阐述一个表示本发明实施例的全息摄影回放系统的原理图;

图 8 阐述一个表示本发明实施例的非晶形碳胶片上的金颗粒的全息图的所选区域;

图 9 阐述图 8 中表示本发明实施例的全息图的付里叶变换的模量的所选区域(中心区域:自相关;左和右区域:边带);

图 10A 阐述 Scherzer 聚焦处的反传递函数;

图 10B 阐述一个表示本发明实施例的 Gabor 焦点处的全息摄影专用传递函数;

图 11 阐述一个表示本发明实施例的以 $s = 4.66$ 的采样率使用 32 个采样点(离散付里叶变换中显示点的数量为 32)的余弦模式的离散付里叶变换的模量;

图 12 阐述一个表示本发明实施例的根据等式(6)的(余弦模式只限于与来自图 11 的数据相同的区域(实际空间内)及图 11 中找不到此图中的任何细节)余弦模式的分析付里叶变换的模量;

图 13 阐述一个表示本发明实施例的余弦模式(显示点的初始集是图 11 中的 32;选择参数 π 为 16,扩展付里叶变换中的显示点数量为 512 及显示与分析付里叶变换中可见的相同细节)的扩展付里叶变换的模量;

图 14 阐述一个表示本发明实施例的用于显示偏移了象素的一部分的传统离散付里叶变换(再一次使用与图 11 相同的余弦模式;为 Δk (及为二维中的 Δl)选择真实值,有可能显示付里叶空间中的至少一个峰值以使它直接落在显示点上;在此情况下,边瓣消失(见右峰值))的扩展付里叶算法的结果;

图 15 阐述一个表示本发明实施例的根据并不真正地处于中心的边带所重构的幅值会在图象中造成假象(最坏的情况是当边带中心正好落在付里叶空间的显示点中间);

图 16 阐述一个表示本发明实施例的具有通过透镜照明的全息图采集系统的 Mach-Zender 原理布局;

图 17 阐述一个表示本发明实施例的数字全息图采集系统布局, 用于阐述从一个照明分束器和光束合并器的面反射出来的物光束, 从而消除像散;

图 18 阐述一个表示本发明实施例的数字全息图采集系统的照片;

图 19 阐述一个表示本发明实施例的实际回放系统的原理图;

图 20 阐述一个表示本发明实施例的铌酸锂晶体和全息图写/回放光学系统;

图 21A 和 21B 分别阐述表示本发明实施例的适用于全息摄影回放系统的透射性和反射性空间光调制器的光学几何;

图 22 阐述一个表示本发明实施例的如同全息回放系统所实施的 800 x 600 计算机驱动的空间光调制器并且后随以一个偏振器; 及

图 23 阐述一个表示本发明实施例的用于显示空间光调制器象素边缘衍射阶(中心亮点是零阶衍射图象)的筒状透镜的付里叶平面上的激光束的照片。

图 24A - 24D 阐述一个表示本发明实施例的与 1/4 波板组合的偏振分束器。

优选实施例的描述

更全面地参照附图中阐述的和以下说明中细化的非限制性实施例来解释本发明及其不同特征和优点。熟知的部件和处理技术将被忽略以避免不必要地使本发明的细节模糊。

1. 系统概述

迄今为止没有开发数字全息摄影的原因是数字视频摄象机或适用于数字媒质的摄象机还不是足够好以便记录传统全息图中固有的非常高的空间频率。本发明将数个能够克服此困难的技术组合起来, 因而允许记录全息图和所有它们的空间频率, 高至记录用摄象机的固有全

息摄影分辨率，以供付里叶变换全息图分析之用。

必须意识到如何数字地记录一个光学全息图（及意识到它是一个全息图）。还必须意识到干涉量度学中所用付里叶变换技术和电子全息摄影能够用于分析全息图。还必须意识到，将一个平面波在算术上加于数字全息图并将所得强度函数写至一个光学上敏感晶体，将能允许使用与用于建立原始边带全息图的角度不同（及大得多）的衍射角 α 实际地回放全息图。

2. 优选实施例的详细描述

现在参照图 2，一个简单的直接至数字的全息摄影系统被显示以便阐述已经被组合的硬件概念，用于数字记录和回放全息图。来自激光器 210 的光束被光束扩展器/空间滤波器 220 所扩展。扩展的/滤光的光束然后通过一个透镜 230。然后该光束射向一个分束器 240。分束器 240 可以是例如 50% 反射性的。被分束器反射的光束组成一个物光束 250，它射向一个物体 260。从物体 260 反射的那部分光束然后通过分束器 240 并且射向一个聚焦透镜 270。该光束射向一个电荷耦合设备（CCD）摄像机（未示出）。

与此同时，来自透镜 230 并且通过分束器 240 的那部分光束组成一个参考光束 280。参考光束 280 以小角度从镜面 290 反射回来。来自镜面 290 的反射参考光束然后射向分束器 240。被分束器 240 反射的那部分反射参考光束然后射向聚焦透镜 270。来自聚焦透镜 270 的参考光束然后射向 CCD 摄像机。来自聚焦透镜 270 的物光束和来自聚焦透镜 270 的参考光束一起组成多个同时参考和物体光波 300。

将图 2 与图 1 进行比较，可以看出，至少以下差别允许 CCD 摄像机建立全息图而不使用胶片或照相底板。（1）本发明使用一个高分辨率 CCD（例如 1 百 40 万个象素），（已经有超过 6 千万个象素的 CCD 可供使用）。（2）本发明使用一个“Michelson”光学几何（分束器、参考光束和物光束的几何关系将在非常小的角度下组合，参考光束镜面和 CCD 能够仿真一个 Michelson 干涉仪光学几何）。此光学几

何允许将参考光束镜面偏转以便建立小角度，从而使全息图付里叶分析的外差或边带在空间上出现干涉条纹。(3)本发明使用一个聚焦透镜来将物体聚焦于 CCD 的焦平面上。此透镜还按照需要通过使用不同聚焦长度和调整相应的空间光学几何(例如物体距离与图象距离之比)来提供放大或缩小作用。前述三个因素与文献中熟知的付里叶变换软件分析方法一起用于直接至数字地记录和回放全息图。(10-12)

该系统适用于实时地记录和回放全息摄影图象或者将它们存储以备事后回放。由于全息图是数字地被存储的，能够建立一串全息图以便建立一个全息摄影动画或全息图，它们能够被电子地播送以便在远处回放从而提供全息摄影电视(全息电视)。由于全息图存储幅值和相位，而相位正比于波长和光路长度，这个直接至数字全息摄影也能用作极端精确的测量工具，用于证实精确部件、组件等的形状和尺寸。类似地，将全息图立即数字地存储的能力能够提供一种用于数字全息摄影干涉量度学的方法。相同物体的各全息图在某些物理变化(应力、温度、精密加工等)后能够彼此相减(相位直接相减)以便计算该变化的物理测量(相位变化正比于波长)。类似地，能够通过将两个类似物体的相应全息图相减而测量第二物体与第一或主物体的偏差从而将它们进行比较。为单值地测量 x - y 平面中两个象素之间在 z 平面中大于 2π 的相位变化，必须在多于一个波长的情况下记录全息图(双频率干涉量度学的内容是文献中熟知的，因此此处不再重复)。

本发明将高分辨率视频摄像机的使用、全息摄影物光束和参考光波的非常小角度混合(这个角度的混合导致每个干涉条纹有至少两个象素和每个需要分辨的空间特征有至少两个干涉条纹)、在记录(摄像机)平面处的物体成象和空间低频外差(边带)全息图的付里叶变换分析都结合起来，从而有可能记录全息摄影图象(图象中为每个象素记录幅值和相位两者)。此外，能够在涉及物体聚焦的一个或多个透镜的后焦平面中使用一个孔径快门，以便阻止任何高于图象系统所能分辨的频率的混叠(混叠现象在文献中是彻底地讨论的，及在透镜的后焦平面中放置孔径快门以便限制空间频率的做法也是很好地描述

和了解的)。如果所用空间频率都能被图象系统所分辨,则不需要任何孔径。一旦被记录,有可能或者回放全息摄影图象为一个二维显示器上的 3-D 相位或幅值曲线,或者使用一个相位变化晶体和白光或激光束回放完整的原始记录光波以便回放原始图象。使用激光器将原始图象写入相位变化媒质而回放它,及或者白光或者另一个激光器被用于将它回放。使用激光器的三种不同颜色来记录图象并且合并回放的图象,有可能做成一个真实颜色的全息图。通过连续地写入和转播一串图象,有可能形成全息摄影动画。由于这些图象是数字地记录的,它们也能使用合适的数字编码技术通过射频(RF)波(例如微波)或通过光纤或电缆的数字网络进行播送,以及在远处回放。这能有效地实现全息摄影电视和动画或“全息电视”。

至于使用透镜将物体聚焦于 CCD 的焦平面而言,一个点的衍射图形能够用一个球函数加以描述,当离该图形中心的距离增加时,该球函数具有愈加靠近的干涉条纹。由于这些干涉条纹愈来愈靠近,它们无法由一个视频摄象机加以分辨。更坏的是,这些来自一个复杂物体的点衍射图形建立一个不现实地密而复杂的图形,它在任何地点都无法由一个视频摄象机分辨。通过将物体聚焦于记录平面上,能够消除这些衍射图形,以使现代高分辨率视频摄象机能够以合理的可信度记录全息图。

如果该记录媒质分辨 100 线/mm,则在单位放大倍数的情况下全息摄影分辨率将为大约 16 线/mm,或 50 微米的数量级。可以使用一个放大透镜来增加此限值。对于 100 线/mm 的摄象机分辨率,如果使用 10 的放大倍数,则全息图分辨率将为大约 160 线/mm。类似地,在记录摄象机上的原始图象的任何缩小将会减少空间分辨率。

本发明也能被实施于多个迭代方案中。例如,本发明能够使用每个象素移相而不是外差采集全息图的相位和幅值。移相干涉量度学是文献中很好地阐述的。作为另一个例子,本发明能够使用许多不同的将强度模式写入一个光学上敏感晶体的方法。这些方法包括使用一个精确聚焦的扫描激光束(而不是使用空间光调制器),使用一个空间

光调制器 (SLM) 而不偏转激光束来写入, 以及使用写入方案的许多可能的光学几何变动。作为另一个例子, 本发明能够使用一个采用光学效应而不是相位变化的光学上敏感晶体, 以便建立衍射光栅而回放全息图。作为又一个例子, 本发明能够实际上使用一个非常精细像素空间光调制器来建立强度模式, 从而不需要将强度模式写入一个用于回放全息图的光学上敏感晶体。

例子

以下将通过非限制性例子进一步描述本发明实施例, 该例子用于较详细地阐述不同主要特征。该例子只是为了便于理解实现本发明的各种方法, 以便帮助专业人员实施本发明。因此, 不应该将该例子构成为限制本发明范围。

图 3A 是一个用于直接至数字全息摄影的示例性 “Michelson” 光学几何的透视图。激光束被提供给分束器 310。来自分束器 310 的物光束射向一个半导体晶片安装架 320, 然后射向一个聚焦透镜 330。与此同时, 一个来自分束器 310 的参考光束射向一个参考光束镜面, 该参考光束镜面被安装于压电参考光束镜面安装架 340 上。

图 3B 是该示例性记录用 “Michelson” 光学几何的另一个透视图。在此透视图, 能够更容易地了解到直接至数字 CCD 摄象机 350 相对于设备的其他子部件的位置。在此透视图, 也能更容易地了解到物体标本安装架 360 的位置。

图 4 是镜面 (此例中是物体) 中一个涂写的外差 (边带) 全息图。该全息图是使用图 3A - 3B 中阐述和以上阐述的直接至数字全息摄影系统所制成。全息图中能够观察到的干涉条纹是由于参考光束和物光束之间的干涉作用。该参考光束镜面稍微偏转以便建立这些干涉条纹。由于这些干涉条纹的存在, 就有可能对全息图进行付里叶变换分析以便计算全息图各象素的相位和幅值。该付里叶变换分析将在下面更详细地讨论。

图 5 是图 4 的二维付里叶变换的图形曲线。x 轴是沿着 x 方向的空

间频率轴及 y 轴是沿着 y 方向的空间频率轴。实际数据本身是 (f_x, f_y) 频率空间内对应于一个特定空间频率强度的数字矩阵。白点的数字和亮度显示图 4 中所示空间频率的频率空间内的强度和位置。能够从图 5 中知道, 参考光束干涉条纹用作一个外差本地振荡器, 用于将真实和虚拟全息图象偏移至轴外以及在频率空间内将它们分离。从香农理论 (或 Nyquist 极限) 知道, 每个干涉条纹至少需要两个象素用于分辨一个干涉条纹, 以及每个可分辨特征至少需要 3 个干涉条纹用于从电子全息摄影中分辨全息图中的物体 (正常情况下每个特征需要 3 个至 4 个干涉条纹用于分辨载波空间频率加上物体频率, 但 Voelkl 等使用扩展付里叶变换时每个特征只需 2 个干涉条纹)。因此, 这两个极限决定物体所需放大倍数和参考光束与物光束之间的偏转角度以便在全息图中分辨一个特征 (空间频率)。

图 5 中所示数据通过如下操作被分析: 将付里叶空间内的各轴变换 (偏移) 为位于外差载波频率 (由物光束与参考光束之间的小偏转角所引起的空间频率) 顶部之上, 然后应用一个数字滤波器 (例如汉明或 Butterworth 滤波器) 将原始原点周围的信号 (这些信号实际上是参考光束与它本身相互作用及物光束与它本身相互作用的结果, 而从全息图的观点看它们只是噪音) 滤去, 以及然后完成逆付里叶变换。所有这些分析都能够在数字计算机上执行, 并且能够实时地执行。实时分析可能需要多至 30 至 100 个高性能并行处理器 (例如 Pentium Pro 或 DEC Alpha) 以便达到每秒 30 帧的帧频。这类尺寸的计算机系统当今通常用作大数据库服务器和证券交易用计算机器。它们也适用于短期低分辨率天气预报以及胶片工业的图象操纵和建立。可以预料, 这类系统将在 6 至 10 年内成为桌上系统。

图 6 显示通过对来自图 5 的数据 (全息图) 完成如上所述的分析而建立的相位数据的回放。为将这些数据回放为一个实际全息图, 要求在一个光学晶体内建立一个衍射光栅及使用激光束 (或合适地处理过的白光) 对衍射光栅以正确角度进行照明。通过将一个函数 $f(x, y, z^0)$ 加至全息图数据的每个象素 $h(x, y, z^0)$ 而从全息图数据中计算实际上

写至光学上敏感晶体的数据，其中这两个函数都是复数以及：

$$f(x,y)=e^{ik\cos(\alpha)r}$$

及 r 是 $x^2 + y^2 + z^2$ 的平方根。

以上所加上的指数函数在物理上对应于增加一个平面波，它以角度 α 与全息图的原始物体光波相交。根据该和数所建立的函数被其共轭复数相乘以便形成绝对值强度函数，它使用激光器写至光敏感晶体（也可能只写参考光束与物体的强度的互相关项而去掉自相关项）。光敏感晶体内如此建立的衍射光栅然后能够使用激光束以角度 α 进行照明而回放原始全息图。如果当使用激光束写入时所使用晶体具有暂时相位变化或折射率变化，然后连续地写入来自瞬时地采集的或存储的全息图的新图象，并且使用来自另一个激光器的激光束（或合适地处理过的白光）以角度 α 照明每个图象，则能够建立一个 3-D 动画或 3-D 电视图象。这只是一个可能的而不是唯一的用于将全息摄影图象写至光学上敏感晶体并且然后回放它的方法。

图 7 阐述一个使用本发明生成一个动画或电视图象的方法。能够知道，通过将两个激光束相交于一个相位变化晶体 710 内而将全息图写至相位变化或其他光学上活性晶体。激光束 1 通过一个空间光调制器 720 以便将进入它的如上所述地从原始全息图中在算术上建立的全息图强度模式进行调制。SLM 720 由一个计算机 740 通过数据路径 750 进行控制。一个聚焦透镜 730 在激光束 1 与激光束 3 相交的相位变化晶体 710 内将此模式进行聚焦，其中两个激光器的组合强度适合于将该模式写至晶体 710。在写入模式后，以角度 α 入射于晶体 710 上的激光束 2 将原始全息图进行回放。

光波全息摄影入门

为更加容易地理解此处描述的全息图处理步骤，首先简单地回顾一下轴外全息摄影的本质是有用的。在一个配备有高度相干电子源例

如一个使用场发射电子枪的电子显微镜中，入射于标本上的电子束在理想情况下是一个平面波。实际上，如果照明分布于一个大范围内，则能够在合理地做到这点。在此理想情况下，显微镜内的物体将入射平面波($ik\vec{r}$)修改为物体光波 $o(\vec{r})$ ，它被定义为：

$$o(\vec{r}) = a(\vec{r}) \cdot e^{i\varphi(\vec{r})} \quad (1)$$

$a(\vec{r})$ 和 $\varphi(\vec{r})$ 两者都是实函数并且分别用于描述物体幅值和物体相位。向量 \vec{r} 是标本平面或(x, y)平面内的向量。为简化起见，放大因子和图象旋转都被忽略，因此图象平面和物体平面内的向量重合。

当记录轴外全息图时，理想情况下该物体只位于双棱镜的一侧。该双棱镜然后使用参考光波即双棱镜另一侧的光波覆盖图象光波（取决于实验的设置，也可为物体光波）（Lichte, 1986; Joy 等, 1993; Möllenstedt & Düker, 1956; Tonomura, 1993）。理想情况下，参考光波是一个平面波，它并不穿过标本的任何部分。然而这不是唯一要求，如果参考光波穿过标本或被磁场或电场所变形，仍然能够获得可接受的结果。在双棱镜之下的图象平面中，我们找到图象强度为：

$$I(\vec{r}) = 1 + A^2(\vec{r}) + I^{inel}(\vec{r}) + 2 \cdot A(\vec{r}) \cdot \cos(\Delta\vec{k} \cdot \vec{r} + \Phi(\vec{r})) \quad (2)$$

其中附加项 $I^{inel}(\vec{r})$ 考虑到非弹性散射的光子。 $|\Delta\vec{k}|$ 项描述全息摄影干涉条纹的空间频率。 $A(\vec{r})$ 和 $\Phi(\vec{r})$ 描述图象幅值和相位，由于物镜的象差（及其他干扰源），它们与物体的幅值和相位不同。 μ 项描述不使用物体即 $A = 1$ 及 I^{inel} 和 Φ 为零时干涉条纹的反差。

在图 8 中，从非晶形碳膜上金颗粒的全息图中选择一个小区域，用于显示干涉条纹。它们从图象的左上角伸展至右下角。为提取关于（复数）图象光波和来自幅值和相位的信息，完成图象强度 $I(\vec{r})$ 的付里叶变换（FT）并且获得：

$$\begin{aligned}
 FT\{I(\vec{r})\} = FT\{I + I^{*} + A^2(\vec{r})\} + \\
 \delta(\Delta\vec{k} - \vec{q}) * FT\{A(\vec{r}) \cdot e^{i\phi(\vec{r})}\} + \\
 \delta(\Delta\vec{k} + \vec{q}) * FT\{A(\vec{r}) \cdot e^{-i\phi(\vec{r})}\}
 \end{aligned} \tag{3}$$

其中*标示卷积。

图 8 全息图的付里叶变换被显示于图 9 中。中心区域被认为是“自相关”，它对应于一个传统图象的付里叶变换。此图象的有趣特征是“边带”，它看上去像围绕自相关的耳朵。更近的观察显示例如相对于边带中心没有中心对称：互相面对的光束并不具有相同强度；这是算术上的必要性。

等式(3)的最后两行对应于图 9 中的两个边带。通过将边带中的一个隔离掉，我们保留复数图象光波的付里叶变换。忽略色差，该复数图象光波的付里叶变换按照以下方式对应于复数物体光波的付里叶变换：

$$FT\{A(\vec{r}) \cdot e^{i\phi(\vec{r})}\} = FT\{A(\vec{r}) \cdot e^{-i\phi(\vec{r})}\} \cdot e^{i\chi(\vec{q})} \tag{4}$$

其中 $\chi(\vec{q})$ 项描述等平面光波色差。此处， \vec{q} 是付里叶空间（或倒数空间）即物镜透镜的后焦平面内的一个二维向量。从此等式能够明显看出，如果 $\chi(\vec{q})$ 已知，则此信息能够用于消除 $\chi(\vec{q})$ 的影响，其结果是改进点分辨率（Tonomura 等，1979；Fu 等，1991）。这是所希望的，因为高分辨率晶体结构图象的解释将变为更直觉。

除可能改进显微镜的点分辨率之外，另一个光波全息摄影的重要特征是图象相位的直接可存取性。与作为正弦函数的传统反传递函数（Reimer, 1989, 如图 10A 中位移的）相反，物体相位对图象相位的传递函数由余弦函数加以描述。此传递函数被显示于图 10B 内。余弦类传递函数的优点是大区域反差（尺寸 > 1nm 的细节）不会减少，及除点分辨率稍微下降之外，图象相位中的信息总量高于 Gabor 焦点处的图象强度中的信息（Weierstall, 1989；Lichte, 1991）。这是某些情况下为何图象相位的直接显示优选于图象强度的一个原因。

扩展付里叶变换

为估计计算机中的全息图，传统上使用离散付里叶光学。虽然图象的离散付里叶变换包含与原始图象相同的信息，但传统离散付里叶变换并不是完成此任务的理想工具。

为阐述此点，我们考虑一个其尺寸为 $N \times N$ 个象素的离散图象，它能够容易地从一个慢扫描 CCD 摄象机中获得。假设 CCD 摄象机的一个象素的尺寸具有度量 $d \times d$ ，及相邻象素之间的距离也是 d 。为每个象素记录图象函数 $I(x, y)$ ，并且具有值为：

$$I_{mn} = \frac{1}{d^2} \int_{(m-1)d}^{md} \int_{(n-1)d}^{nd} I(x, y) dx dy, \quad (5)$$

其中 $m, n = 1, \dots, N$ 。由于在象素面积上的积分， $I_{m,n}$ 与在象素中心 $((m-1/2)d, (n-1/2)d)$ 处的函数 $I(x, y)$ 值略有不同。此效果与其他效果一起对 CCD 摄象机的 MTF 起作用。对于这个讨论，我们假设已经校正 MTF，因此 $I((m-1/2)d, (n-1/2)d) = I_{m,n}$ 。我们还暂时假设对于 $0 \leq x, y \leq Nd$ ， $I(x, y)$ 具有以下形式：

$$I(x, y) = \cos [2\pi(xu + yv)] \quad (6)$$

而在别处则为零。对于 $0 \leq m, n \leq N$ ，数字化图象 $I_{m,n}$ 为：

$$I_{m,n} = \cos \{2\pi[(m-1/2)ud + (n-1/2)vd]\} \quad (7)$$

而在别处则为零。我们把为在垂直于等式 (7) 中所定义干涉条纹的方向内覆盖 2π 所需象素数量定义为空间频率 $\sqrt{(u^2 + v^2)}$ 的采样率 s ：

$$s = \frac{1}{d\sqrt{u^2 + v^2}} \quad (8)$$

不要求此象素数量为整数。采样理论认为，如果图象函数 $I(x, y)$ 被如

此采样以使 Nyquist 极限之下没有图象的空间频率被采样⁽¹²⁾，则在 CCD 摄象机的区域内图象函数是唯一地被定义的。换言之，如果图象函数 $I(x, y)$ 的所有空间频率都被使用 $s \geq 2$ 进行采样，则在 CCD 摄象机的区域内关于图象函数 $I(x, y)$ 的信息是完全的。因此，如果使用例如 124×124 个或 13789×13789 个采样点（即显示点）在实空间和付里叶空间两者内都显示 $I(x, y)$ ，则只是显示器的问题。离散付里叶变换 $FT^d\{\dots\}$ 被定义为：

$$FT^d(\dots) = \frac{1}{N} \sum_{m,n=1}^N (\dots) e^{-2\pi i(km+\epsilon)/N} \quad (9)$$

其中 $N/2 \leq k, 1 \leq N/2-1$ 。图 11 显示一维内和 $N = 32$ 时等式 (7) $FT^d\{I_m\}$ 的付里叶变换的模量。使用扩展付里叶算法的动机原本来自 $FT^d\{I_m\}$ 的模量显示与等式 (6) $FT^a\{I(x)\}$ 的分析付里叶变换的模量显示之间的惊人差别。该分析付里叶变换 FT^a 被定义为：

$$\begin{aligned} FT^a\{\dots\} &= \iint_{-\infty}^{\infty} \{\dots\} e^{2\pi i(xu+yn)} dx dy \\ &= \iint_0^{Nd} \{\dots\} e^{2\pi i(xu+yn)} dx dy. \end{aligned} \quad (10)$$

$FT^a\{I(x)\}$ 的模量被显示于图 12 中。在比较图 11 和 12 之后能够清楚地看出，图 12 中能够看见的细节在图 11 中都看不见。此外， FT^a 在付里叶空间内扩展至无穷，而 FT^d 的扩展不超过 $1/(2d)$ 处的熟知的 Nyquist 极限。

（离散）扩展付里叶变换 EFT 被如下定义：

$$\begin{aligned} EFT\{\dots\} &= \frac{1}{N} \sum_{m,n=1}^N \{\dots\} \\ &\quad \times e^{-2\pi i[(k+\Delta k)m+(l+\Delta l)n]/(N\tau)}, \end{aligned} \quad (11)$$

其中 $-1 \leq \Delta k, \Delta l \leq 1; -N\tau/2 \leq k, 1 \leq IN\tau/2-1$ 。逆扩展付里叶变换被定义

为:

$$\text{EFT}^{-1}\{\dots\} = \frac{1}{N\tau^2} \sum_{k,l=-N\tau/2}^{N\tau/2-1} \{\dots\} \times e^{-2\pi i[(k+\Delta k)m+(l+\Delta l)n]/(N\tau)}, \quad (12)$$

新变量 Δk , Δl 和 τ 允许改变付里叶空间内的显示以及显示点数量。注意到当 Δk , $\Delta l = 0$ 和 $\tau = 1$ 时 $\text{EFT} = \text{FT}^d$ 。

τ 的影响

可从图 13 中看出 τ 的影响。使用 $\tau = 16$ 和 Δk , $\Delta l = 0$, 现在有 $N\Delta = 512$ 个点而不是图 11 中的 $N = 32$ 个点被显示于付里叶空间内。显然, 可在分析付里叶变换 (图 12) 中看见的细节也出现于离散 EFT 中。但是再一次, EFT (对于 $\tau \geq 1$) 和 FT^d 两者包含相同信息。在分析付里叶变换的模量与扩展付里叶变换的模量的显示之间还有两个差别。首先, 对于扩展付里叶变换仍然存在 Nyquist 极限及没有空间频率能超过 Nyquist 极限。其次, 受限制的图象区域在付里叶空间内造成较高频率, 它们在 Nyquist 极限处被反射回来并且造成差别例如 FT^a 中能够看见的非常小的细节的消失。

Δk 的影响

EFT $\{I_m\}$ 中 Δk 的影响被显示于图 14 中, 这是特殊情况 $\Delta k = 0.133$ 和 $\tau = 1$ 。与图 11 比较, 现在付里叶空间中两个峰值中的右侧一个正好与一个象素 (或显示点) 重合。如图 11 中可看见的, 这使边带消失。

对于轴外光波全息摄影而言, 付里叶空间中的显示点的偏移很重要, 对于图象幅值的重构特别重要 (在大多数情况下, 在重构相位中由于边带中心偏离显示点而造成的楔状部分能够容易地给予补偿)。边带中心偏离显示点的效应是在重构幅值中产生噪音。

我们能够演示重构时在付里叶空间中边带中心实际上偏离显示点的效应。为做到此点, 我们在计算机中生成一个空全息图 (图象尺寸

512 X 512) 以使边带准确地落在付里叶空间中的显示点(k, l)上。在此情况下, 重构的幅值是平的并且显示出平均标准偏差有效地为 0%。生成中的稍微变换例如采样率 s 的减少促使边带中心落在显示点(k, l) 与(k+1, l+1)之间。再次计算平均标准偏差, 以及我们继续减少采样率直至边带中心落在显示点(k+1, l+1)上。此仿真的结果被显示于图 15 中。在最坏的情况下, 当边带中心被发现位于(k+1/2, l+1/2)处时, 重构幅值的平均标准偏差到达 10%。

基于以上观察, 以下重构过程是有利的:

- (1) 选择不显示物体影响的区域全息图(如果可能的话)。
- (2) 对此区域(或所有全息图)应用汉明窗口。
- (3) 完成 FT^d 和提取关于边带确切位置的信息。这为扩展付里叶算法定义 Δk 和 Δl 。
- (4) 使用 Δk 和 Δl 上的信息而应用 EFT。使用 $\tau = 1$ 。
- (5) 将现在完全对中心的边带进行隔离。
- (6) 完成逆 FT^d 。
- (7) 提取幅值和相位。

例子。应用汉明窗口和完成 FT^d 。边带的位置例如是 (134.62, 172.31), 使用 10th Pfefferkorn Conf. Scanning Microsc. Suppl. 6(1992) 347 中的 W. J. de Ruijter 等; $\Rightarrow \Delta k = 0.62$ 和 $\Delta l = 0.31$ 。使用这些数据以及 $\tau = 1$ 并且完成全息图的 EFT。现在边带的中心位于一个显示点上并且在重构幅值中减少假象。

数字全息图采集系统的改进

通过透镜照明和 Mach-Zender 光学几何

本发明能够包括标本物体的通过透镜照明而允许物镜靠近物体。本发明能够包括 Mach-Zender 光学几何, 与 Michelson 光学几何相比较, 它提供大范围的载波频率干涉条纹的可调整性而同时保持物光束和参考光束的覆盖。

参照图 16, 激光器 1605 在光学上耦合至可变衰减器 1610, 它在光学上耦合至可变分束器 1615。一个带有光束扩展器组件 1625 的空间滤波器在光学上耦合至可变分束器 1615。照明分束器 1630 在光学上耦合至组件 1625。物镜透镜 1635 在光学上耦合至分束器 1630。一个感兴趣的物体 1640 靠近透镜 1635。光束合并器 1650 通过筒状透镜 1645 耦合至分束器 1630。CCD 摄像机在光学上耦合至光束合并器 1650。参考分束器 1665 通过另一个具有光束扩展器组件 1660 的空间滤波器在光学上耦合至分束器 1615。参考镜面 1765 通过参考物镜透镜 1680 在光学上耦合至分束器 1665。光束合并器 1650 通过另一个筒状透镜 1670 在光学上耦合至分束器 1665。

仍然参照图 16, 一个来自可变分束器 1615 的物光束 1620 通过组件 1625, 然后被照明分束器 1630 反射并且通过物体物镜透镜 1635。该物光束 1620 然后与一个感兴趣的物体 1640 相互作用, 返回通过透镜 1635 及然后通过照明分束器 1630 和通过筒状透镜 1645 射向光束合并器 1650。参考光束 1685 通过组件 1660, 被参考分束器 1665 反射, 然后通过参考物镜 1660。该参考光束 1685 从参考镜面 1675 反射回来, 返回通过透镜 1680 及然后通过参考分束器 1665 及通过筒状透镜 1670 射向光束合并器 1650。合并的光束自光束合并器 1650 射向 CCD 摄像机 1655, 数字数据在该处被收集。当然, 数字数据能够被记录、传输和/或变换。

图 16 显示一个 Mach-Zender 光学几何的原理图。将图 16 的 Mach-Zender 光学几何 (称为 Mach-Zender, 是因为它类似于 Mach-Zender 干涉仪的光学几何) 与 Michelson 光学几何进行比较, 能够看出, 聚焦透镜 (图 16 中的物镜 1635) 能够在更大程度上靠近物体 1640, 因为通过透镜照明的做法允许将用于照明的分束器 1630 放置于物镜透镜 1635 之后而不是在物镜透镜 1635 与物体 1640 之间。这允许使用大数字孔径、高放大倍数物镜观看小物体 (及记录其全息图)。取决于当时情况, 对于大物体, 原始 Michelson 光学几何可能是优选的。

从图 16 中还能知道, 最后光束合并器 1650 正好位于 CCD 摄象机 1655 之前。该最后光束合并器 1650 将参考光束和物光束 1685、1620 合并以便照明数字 CCD 摄象机 1655。能够改变光束合并器的角度以使参考光束和物光束确切地同线, 或者一般而言, 以一个彼此间的角度打在电荷耦合设备摄象机上以便产生外差载波干涉条纹。这允许载波干涉条纹频率在 0 与 CCD 摄象机的 Nyquist 极限之间变化。至少对于放大光学几何而言(在该光学几何中物体全息图被放大以便由数字摄象机进行采集), 最后光束合并器 1650 比 Michelson 光学几何离数字摄象机 1655 靠近得多。这允许物光束与参考光束之间的合并角度相对地大而不至于从参考光束和物光束中造成光点而不再覆盖 CCD 摄象机。这允许对载波频率干涉条纹进行精细得多的控制。有可能在零值直至该系统约束条件所允许最大角度值之间改变两个光束之间的角度而不使外差全息图的空间载波频率超过 CCD 所允许的 Nyquist 频率(即可以增加该角度直至空间载波频率的每个干涉条纹只有两个 CCD 象素 - 当角度超过此值时空间载波频率不再能够准确地被 CCD 所记录)。使用 Michelson 光学几何不可能达到全息图的最大空间载波频率, 因为所需角度可能足够大因而在某些光学几何中在 CCD 摄象机处参考光束和物光束不再覆盖。

分束器/光束合并器的物光束前表面照明用于消除像散

本发明能够包括物光束从分束器的前表面反射, 从而有助于防止图象中的像散。图 16 中布局的限制是当物光束射向 CCD 摄象机时, 它通过照明分束器材料。将照明光学几何修改以使激光束通过分束器时只是为了照明, 而从物体返回的光束从分束器的前表面反射, 这能够消除这点。此光学几何防止由于通过分束器而产生的图象中的像散, 并且简化系统的透镜设计, 不然将需要考虑到分束器的材料。图 17 阐述安装 50X 物镜的这类光学几何, (该系统也用于此配置中, 为 Nikon 10X 和 Nikon 100X 物镜)。

参照图 17, PCX 透镜 1710 在光学上耦合至分束器 1720。标本 1730

通过透镜 1635 在光学上耦合至分束器 1720。能够知道，来自标本 1730 的物光束从分束器 1720 的前表面 1725 反射并且通过筒状透镜 1735 射向光束合并器 1730。也能知道，来自参考镜面 1675 的参考光束从参考分束器 1740 的前表面反射。在此例子中，合并的光束射向一个带有 Kodak KAF-1400 传感器的 Apogee KX-14 摄象机。

四分之一波板和偏振器光束隔离用于抑制不必要的反射

本发明能够包括四分之一波板和偏振器光束隔离的使用，以便抑制不必要的反射。实验已经证明能够使用四分之一波板隔离器设计将来自物镜的透镜表面（或任何其他来源）的杂散反射抑制超过幅值的一个数量级。为使用此技术，照明分束器被一个偏振分束器所替代，该偏振分束器使 p 偏振光束通过而将 s 偏振光束反射，以及一个四分之一波板被放置于物镜与物体之间。该四分之一波板被调整以便当入射的 p 偏振光束打在物体上时被转换为圆形偏振光束。从物体返回的光束再一次通过四分之一波板而被转换为 s 偏振光束。该 s 偏振光束现在被从偏振分束器反射并且通过光学路径而下达至 CCD 摄象机。来自物镜的杂散反射现在被抑制，因为它们仍然是 p 偏振光束而不被偏振分束器所反射。迭代的版本可能是只在筒状透镜之前放置一个偏振器而根本不用偏振分束器。此外，偏振分束器能够使 s 偏振光束通过而将 p 偏振光束反射。为防止由于四分之一波板所引起的像散，在设计该物镜时必须专门考虑到四分之一波板的材料、位置和厚度。否则该四分之一波板将会在物体图象中造成某些像散或其他象差。此技术已经在 ORNL 的系统上试验过，其配置为四分之一波板和偏振器位于筒状透镜之前，以及被发现为能够将不必要的物镜透镜反射和其他噪音抑制至超过一个数量级。

参照图 24A，一个 p 通过 1/4 波板 2410 在光学上耦合至偏振分束器 2420。参照图 24B，一个 s 通过 1/4 波板 2430 在光学上耦合至偏振分束器 2420。参照图 24C，一个 p 通过 1/4 波板 2410 在光学上耦合至偏振分束器 2420 的前表面。参照图 24D，一个 s 通过 1/4 波板 2430

在光学上耦合至偏振分束器 2420 的前表面。

完全相同的物光束和参考光束路径

本发明能够包括尽可能地使用完全相同的物光束和参考光束路径，从而保持载波干涉条纹频率恒定并且允许进行付里叶变换分析。一个变动的载波干涉条纹频率将在回放时产生假象。

从图 16 中能够知道，此设计中的物光束和参考光束路径主要是相同的。问题的使是物光束和参考光束的波前尽可能与数字摄象机（CCD 传感器）处的几乎相同。半相同波前将会干涉和产生具有恒定空间频率的线性载波干涉条纹。如本发明初始公开内容中所讨论的，付里叶变换分析用于消除全息摄影空间载波频率，及一个数字滤光器被用于在逆 EFT 之后只留下物光束相位和幅值。如果全息摄影载波频率不是恒定的，则此技术不起作用，因为由于载波频率的附加频率分量的存在而在逆变换中产生杂散假象。使用半相同物光束和参考光束路径的结果是很恒定的外差全息图的空间载波频率。一个迭代的方法是准确地计算数字摄象机处的物光束波前特性以及使用更简单的光学几何设计来重现参考光束中的波前。图 18 显示 ORNL 处全息摄影实验室中的原型系统的照片，其中实施半相同物光束和参考光束路径。

使用声光调制器替代机械衰减器和无限可变比分束器

本发明能够包括使用声光调制器替代机械衰减器和无限可变比分束器。对于高速操作，及为避免机械快门的磨损和撕裂（例如对于数字摄象机），能够使用声光调制器替代图 16 中所示机械衰减器和可变比分束器两者。单个声光调制器能够用于替代衰减器，和每个参考光束和物光束路径内的一个声光调制器能够用于调整特定路径中的功率并且用作一个高速快门。声光调制器通常由射频（RF）电磁波驱动并且具有一个通常为 1 微秒数量级的接通/关断时间。这对连续地以每秒多帧的帧频采集图象（例如全息电视）的情况特别有用，其中机械部件无法快速地调整并且由于每天操作周期数量大而面临故障局面。

使用光纤为每个分支将激光器耦合至匹配透镜

本发明能够使用光纤为采集系统的每个分支（物光束、回放光束）将激光器耦合至匹配透镜。例如，空间滤波器能够被单模式偏振保持光纤所替代。图 24B 中显示一个光纤 2435。光纤的使用允许激光器系统和声光调制器和其他光束处理部件在需要时远离采集系统，从而不必要再费时地和非常细致地对准空间滤波器的微米尺寸针孔。单模式光纤能够使不在所允许模式中的任何激光束快速地衰减，从而“清理”光束断面。

从图 16 中能够知道，如果镜面和透镜被用于将激光器耦合至“全息摄象机”的物体和参考分支，当激光器远离摄象机系统时这将不方便。远处位置将要求无阻挡光束路径，由于安全性理由或为了不使碎屑和异物侵入光路和光学系统，可能需要将其封装。另一方面，如果单模式偏振保持光纤用于为每个分支将激光器耦合至匹配透镜，则激光器的远处位置是十分方便的，及单模式光纤也抑制除所允许的传播模式外的所有其他模式，以致能够不用图 16 中所示两个空间滤波器。在许多情况下激光器和声光调制器或机械衰减器和分束器的远处位置具有显著优点。激光器通常是笨重的并且对环境有相当要求（冷却、电力等），在重量是重要因素或机动性是重要因素的应用场合中具有灵活连接的远处位置允许全息摄象机头既轻又机动。

数字全息回放系统的改进

实际系统布局

本发明能够包括将 SLM 输出进行付里叶透镜滤光以便去除由于 SLM 象素边缘而引起的光栅效应。图 19 显示一个描述于本发明初始公开内容中的回放系统的实际原理实施图。激光器 1900 通过可变衰减器 1905 在光学上耦合至可变分束器 1910。一个写光束 1950 从可变分束器 1910 通过快门 1955 到达镜面 1960，以及通过空间滤波器 1965 和通过准直透镜 1970 到达空间光调制器 1975。写光束 1950 从空间光

调制器 1975 通过线性偏振器 1977、通过筒状透镜 1980、通过孔径 1985 和通过物镜透镜 1990 到达光束合并器 1945, 然后到达光折射晶体 1995 的焦平面。一个回放光束 1915 从可变分束器 1910 通过 1/2 波板 1920、通过快门 1925、通过空间滤波器 1930 和通过准直透镜 1935 到达镜面 1940、到达光束合并器 1945 (例如分束器), 及然后到达光折射晶体 1995 的焦平面。一组观看光学系统 1999 在光学上耦合至晶体 1995。

仍然参照图 19, 在被滤光和准直至合适尺寸后, 写光束 1950 通过 SLM 1975 (空间光调制器), 在该处它被 (例如由一个计算机驱动的 SLM) 数字地调制以便加上所需全息摄影衍射光栅图案。筒状透镜 1980 和物镜 1990 然后将全息摄影光栅聚焦缩小至合适尺寸并且聚焦于光折射晶体 1995 中 (在此情况下是铌酸锂, 当然钛酸钡和其他光折射晶体是可用的)。缩小倍数用于使晶体 1995 中的全息摄影衍射光栅能够分离出所用零阶光束以供回放和回放的全息图之用。整个回放光束串对于写过程是多余的。一旦全息摄影光栅被写至光折射晶体 1995, 能够通过关闭写光束快门 1955 和打开回放光束快门 1925 来加以回放, 以使写至光折射晶体的全息摄影光栅被回放光束 1915 以正确角度照明从而回放该全息图。选代地, 能够通过关闭对 SLM 1975 的数字调制而使现在近似为未调制平面光波的写光束对先前被写入光折射晶体 1995 的全息图进行照明, 从而将该全息回放。在此配置中, 回放的全息图从晶体 1995 中浮现的角度是回放光束打中该晶体以便在写光束原始方向内回放它的角度。这由图 19 中右下角的向下箭头所表示。在此情况下整个回放光束光学系统和物镜透镜与光折射晶体之间的分束器变得多余和不必要。因此被写入光折射晶体 1995 的全息摄影光栅能够使用回放光束进行回放, 或者选代地由写光束单独进行回放而将空间光调制器关闭, 从而不需要任何回放光束或相关联的设备。由于显示定时的理由, 可能更希望一个或其他配置。

图 20 是 ORNL 处全息摄影实验室中实施的原型回放系统光学系统的照片。有数个合适的商业上现成可用的 SLM, 反射 LCD (液晶显示器), 透射 LCD 两者和微镜面 (例如 Texas Instruments DLP - 数

字光处理器 - 实施例)。通常这些 LCD SLM 需要一个偏振器。

图 21A 和 21B 显示两个适合于在一个全息摄影回放系统中实施的 SLM 光学几何。注意到一个微镜面实施例不要求偏振器并且不像所阐述 LCD 实施例那样转动偏振方向。图 22 显示图 19 中原理性显示的全息摄影回放写光束设置所采用的 800 象素 X 600 象素透射 SLM 的照片。

消除 SLM 象素边缘衍射光栅

本发明能够包括将全息图衍射光栅写至光折射晶体并且使用相同光束进行回放，其中接通 SLM (空间光调制器) 信号以便写入而关闭它以便回放。当没有信号给 SLM 时，写光束成为一个平面波，适合于回放并且不要求使用单独的回放光束。

因为 SLM 象素具有有限边缘 (相对于无限薄而言)，这些边缘形成一个相当强的衍射光栅。如果这些边缘/衍射光栅不被从图象中消除，则它们在写至光折射晶体的全息图光栅中较高频率处造成假象。这些假象是不希望的，因为它们产生光的混淆衍射阶并且与准备写至光折射晶体的所希望的全息图光栅相互作用。

再次参照图 19，这些象素边缘/衍射光栅能够通过将孔径 1985 放置于筒状透镜的付里叶平面处而加以消除，该付里叶平面出现于筒状透镜与聚焦物镜之间。该孔径的尺寸被选为只准零阶衍射光束通过，这能消除象素边缘但不能消除写至 SLM 的图象，因为象素边缘是与 SLM 相关联的最高频率 (按照 Nyquist 极限，象素本身最多能够显示等于象素边缘频率一半的频率)。通过关闭 SLM 和观察由象素边缘造成的衍射阶在何处成为聚焦点，能够容易地找到付里叶平面。图 23 显示激光束通过 SLM 和筒状透镜之后聚焦于筒状透镜付里叶平面处的照片。

使用声光调制器和单模式偏振保持光纤替代衰减器、快门和空间滤波器

本发明能够包括为速度和方便而使用一个声光调制器来替代机械光束衰减器。更具体地，能够为速度和方便而使用一个声光调制器来替代机械快门。

如以上结合全息图采集系统所讨论的，及由于相同理由，能够使用声光调制器（AOM）替代图 19 中所示衰减器和可变分束器。类似地，激光器和 AOM 能够远离全息回放头（“全息电视”头）而使用单模式偏振保持光纤将它们连至回放光学系统。这又一次用于消除由于激光器和 AOM 远离全息电视头而引起的质量和环境（热、振动等）的效应，并且使它变为轻而机动。该光纤再一次用于消除图 19 中所示空间滤波器。

许多类似的光学几何是可能的。能够修改角度；能够修改参考光束和物光束光学几何。能够修改写入光束和回放光束光学几何。具体部件能够被其他种类的部件所替代。用于纪录和回放的激光器波长可以是不同的。该系统也能使用相干 x 辐射、UV、DUV、VUV 或红外相干辐射来实施。该回放系统可以被修改为在写入光折射晶体之后使用白光进行回放。将 SLM 移相而不是幅值调制能够用于回放系统。能够使用铁电体 SLM，而且微镜面（例如 Texas Instruments DLP system）也能用于替代一个 SLM。

本发明的实际应用

技术上具有价值的本发明的一个实际应用是计算机辅助测量的全息摄影干涉量度学。此外，本发明对于全息摄影电视或动画（“全息电视”）是有用的，例如用于娱乐目的或训练目的等。预料光波全息摄影显微镜学和电子全息摄影显微镜学的纳视觉化和三维测量将成为主要科研应用。实际上本发明具有数不清的用途，不必再次一一列举。

本发明对超精确计量学是有用的。本发明对 3D 显示和技术材料和科学数据组的检验是有用的。本发明对 3D 可视新闻、通信、会议、电影、游戏、广告和娱乐目的是有用的。

本发明的优点

至少由于以下理由，一个代表本发明实施例的直接至数字全息图系统是经济上合理的和有优点的。高分辨率 CCD 和光学技术的组合能够将干涉图形（干涉条纹）的密度减少至 CCD 能够记录的密度，与用于干涉量度学的和由 Voelkl 博士用于电子全息摄影的付里叶变换技术组合，允许全息图的电子记录和回放。

所有此处描述和公开的本发明实施例能够被实现和应用而不需过度试验。虽然此处公开了本发明人认为用于实施本发明的最佳模式，但本发明的实施并不限于此。能够表明，能够在不背离本发明基础概念的实质和范围的情况下作出本发明各特征的不同附加、修改和重新安排。因此，专业人员知道，本发明能够与此处描述内容不同地加以实施。

例如，个别部件不必以所公开的形状被形成或被装配于所公开的配置中，而实际上能够以任何形状做成，以及被装配于实际上任何配置中。此外，个别部件不必使用所公开的材料来制造，而是能够使用任何合适的材料制造。此外，虽然此处描述的记录设备是一个物理上独立的模块，但能够表明，记录设备能够与它的相关联设备制造为一个整体。此外，如果每个所公开实施例的元件和特征与每个其他公开实施例的元件和特征不是相互排斥，则每个所公开实施例的元件和特征能够与每个其他公开实施例的元件和特征组合或由其替代。

所附权利要求书意在覆盖所有这类附加、修改和重新安排。本发明的合适实施例由所附子权利要求所区别。

参考资料

1. D. Gabor, Proc. Roy. Soc. London Ser. A A197, 459 (1949).
2. E. Leith and J. Upatnieks, J. Opt. Soc. Am. 52, 1123 (1962).
3. E. Leith and J. Upatnieks, J. Opt. Soc. Am. 53, 1377 (1963).
4. J.B. Develis and G.O. Reynolds, Theory and Application of Holography, Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, 1967.
5. L.O. Heflinger, R.F. Wuerker, and R.E. Brooks, J. Appl. Phys. 37, 642 (1966).
6. F.C. Jahoda, R.A. Jeffries, and G.A. Sawyer, Appl. Opt. 6, 1407 (1967);
7. F.C. Jahoda and R.E. Siemon, Holographic Interferometry Cookbook, LA-5058-MS Informal Report UC-37, Los Alamos Scientific Laboratory, Los Alamos, New Mexico, (1972).
8. M. Kujawinski, in Interferogram Analysis; Digital Fringe Pattern Measurement Techniques, (edited by D.W. Robinson and G.T. Reid), IOP Publishing Ltd., Bristol, England, 1993.
9. K. Creath and T. Kreis, in Holographic Interferometry: Principals and Methods, (edited by K. Rastogi), Springer-Verlag, New York, New York, 1994.
10. E. Voelkl, L.F. Allard, and B. Frost, J. Microscopy 180, pt. 1, October, 1995, pp. 39-50.
11. E. Voelkl, and L.F. Allard, A. Datye, B. Frost, Ultramicroscopy 58, (1995), pp. 97-103.
12. E. Voelkl and L. F. Allard, ICEM-13 (13'th International Conference on Electron Microscopy), 17-22 July, 1994, Paris, France, Proceedings, p. 287.
13. The Electrical Engineering Handbook, CRC Press, (Richard C. Dorf et al. eds., 1993).
14. Handbook of Optics, Volumes I-II, 2nd ed., McGraw Hill Inc., (Michael Bass et al. eds., 1995).

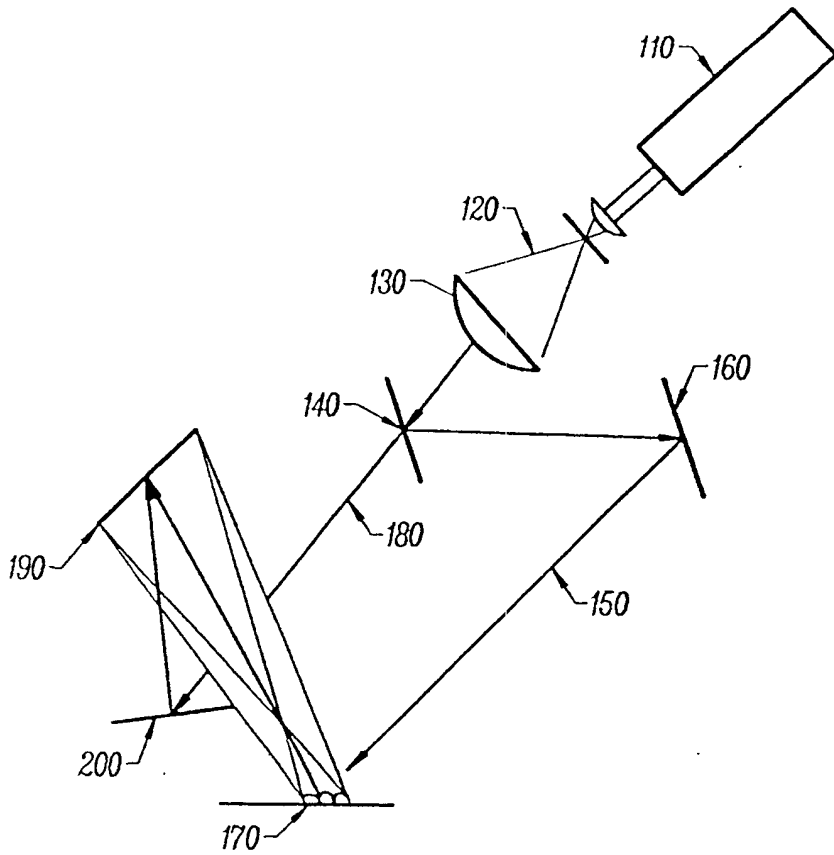


图1
(现有技术)

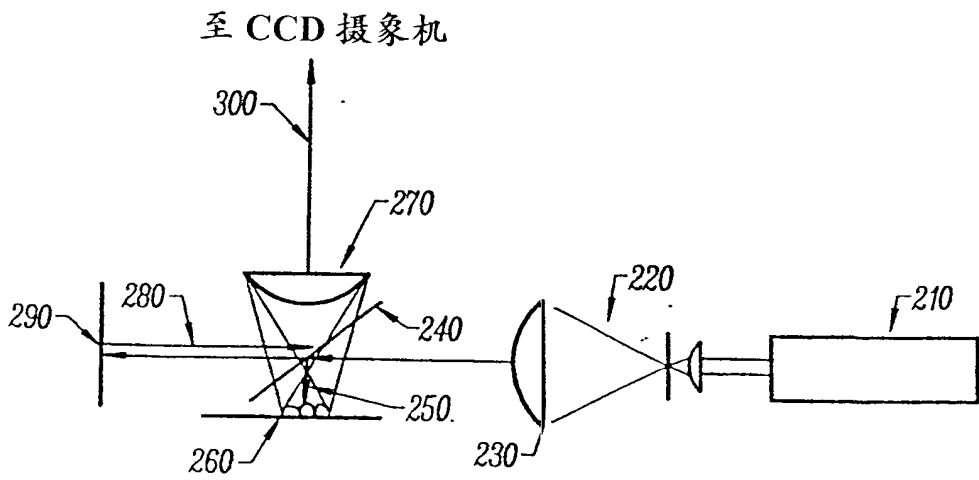


图2

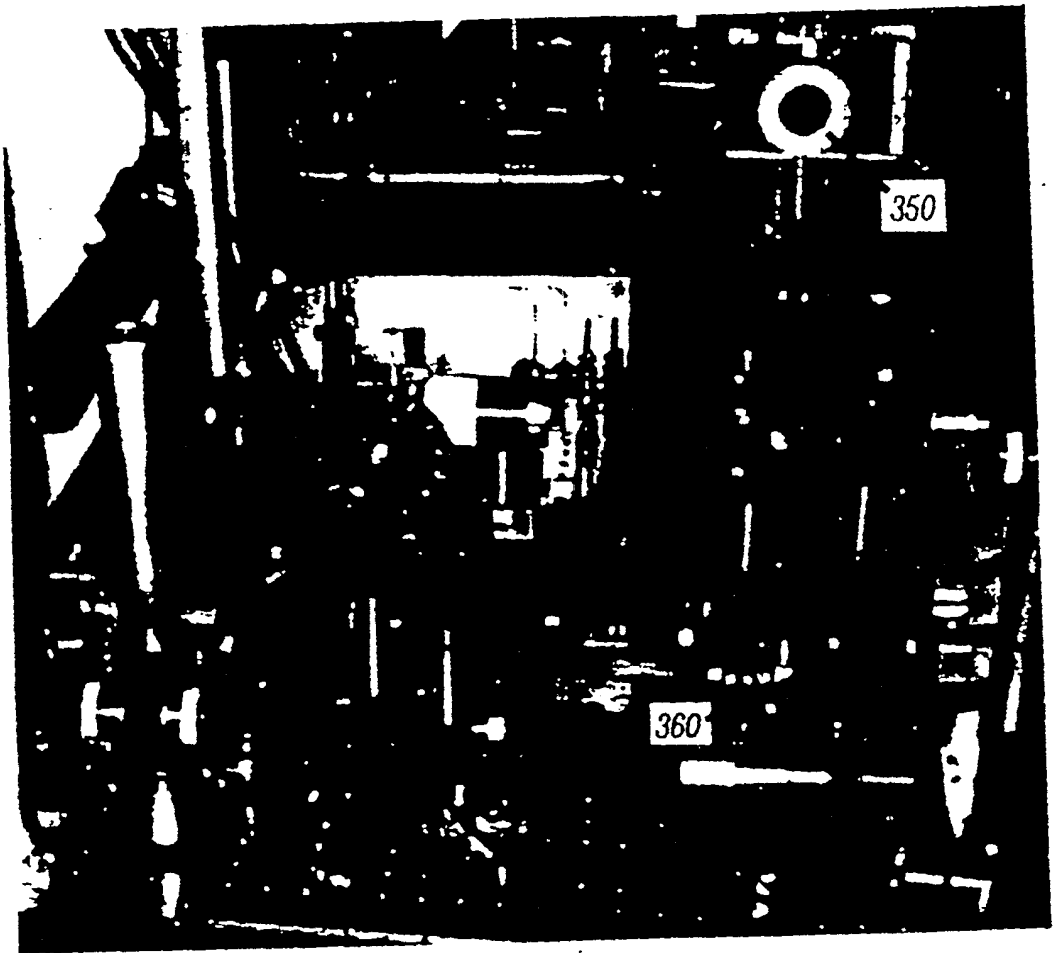


图 3B

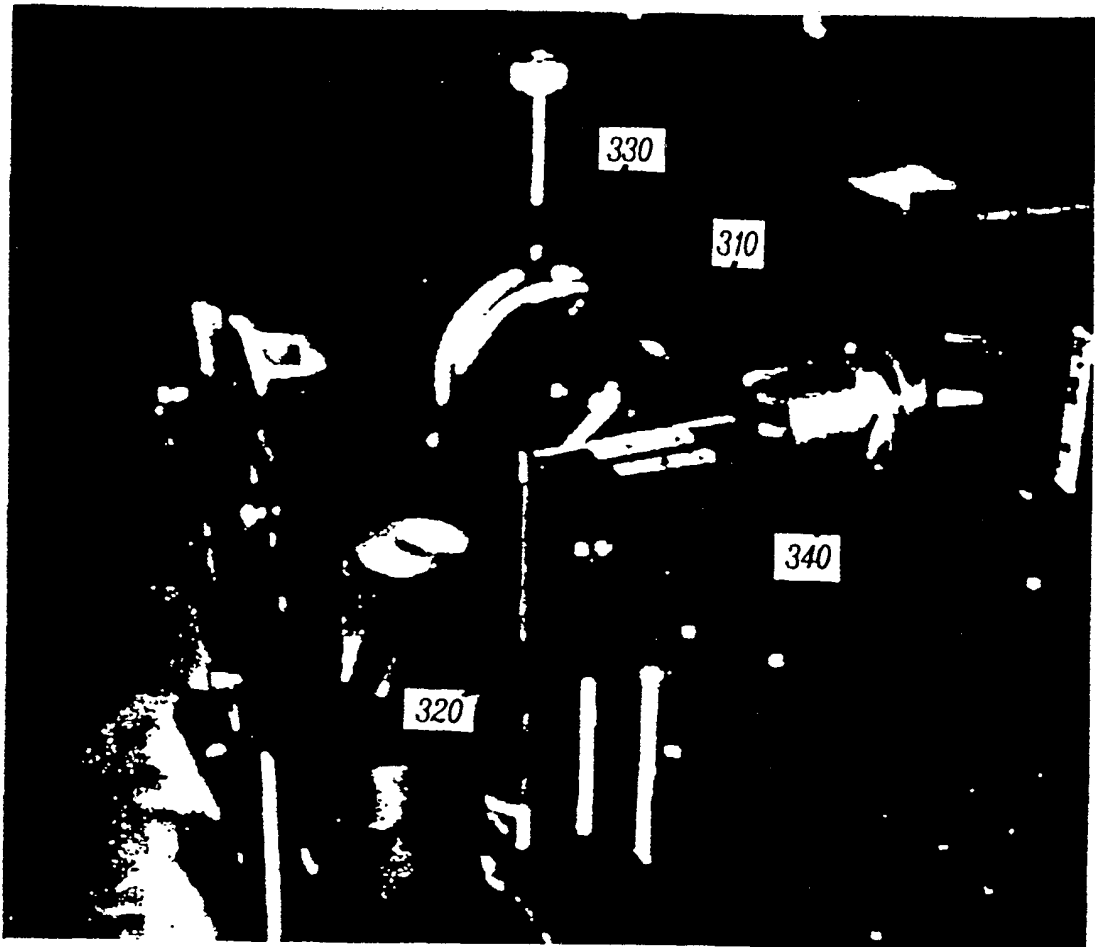


图 3A

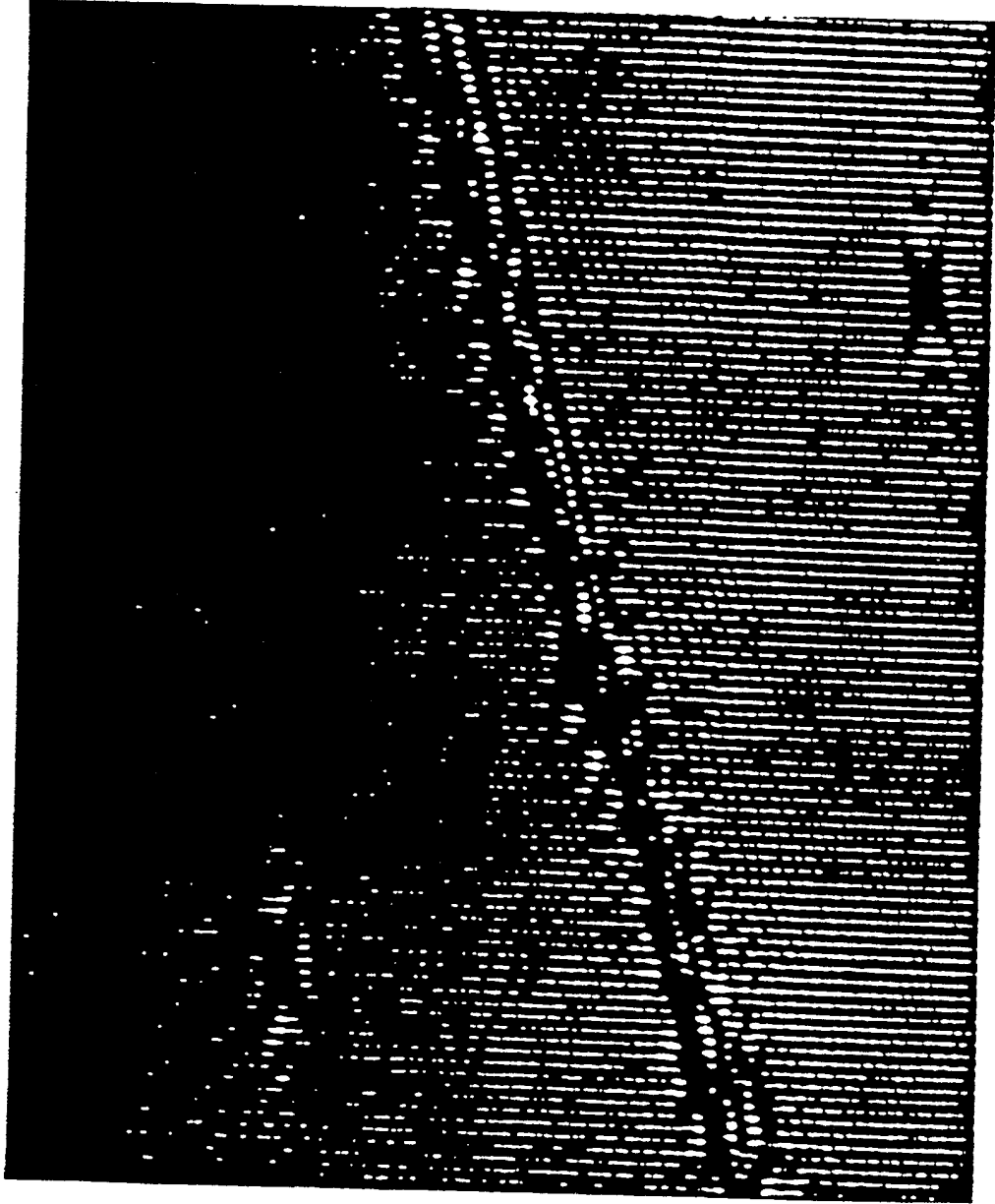


图 4

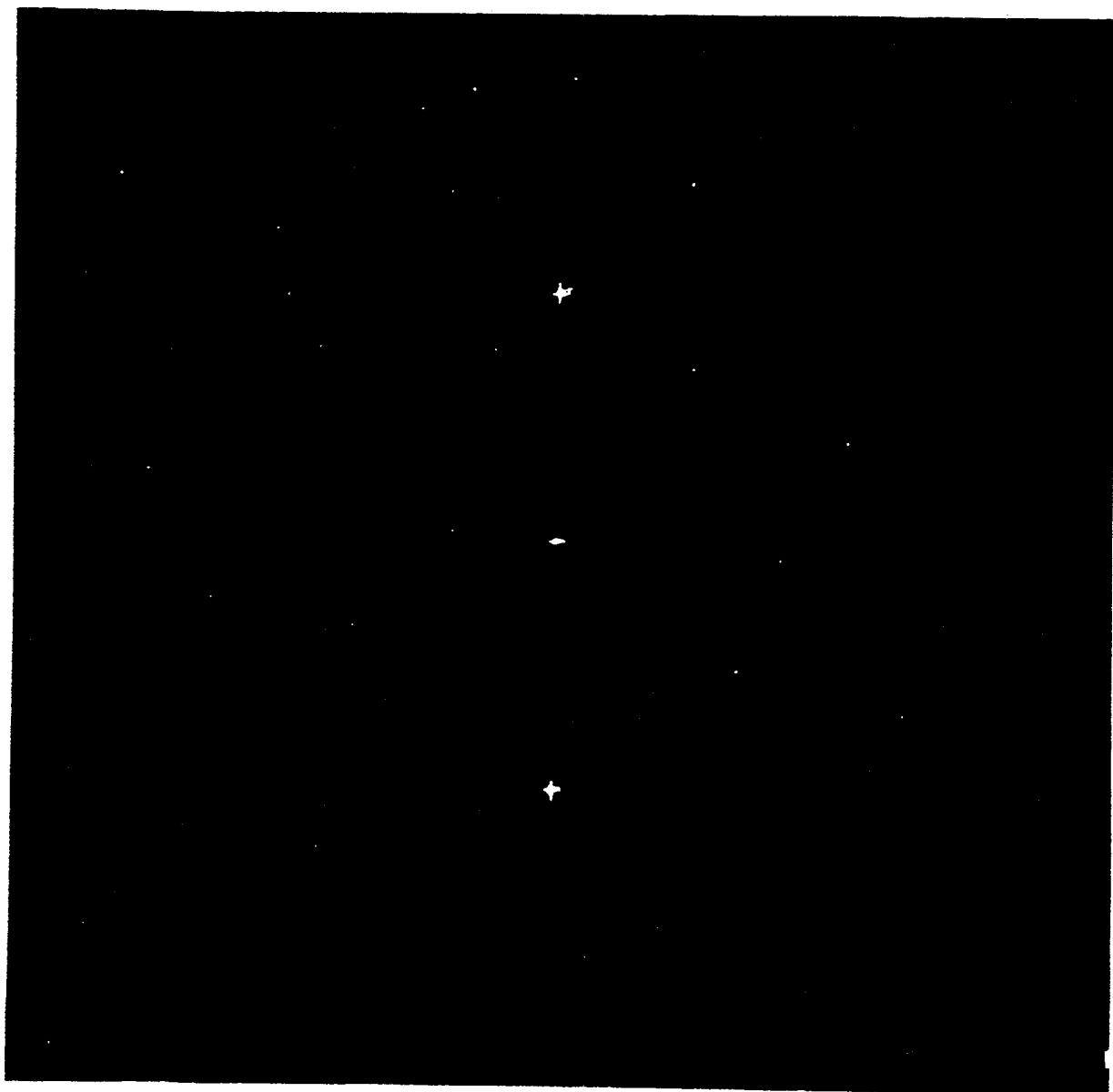


图 5

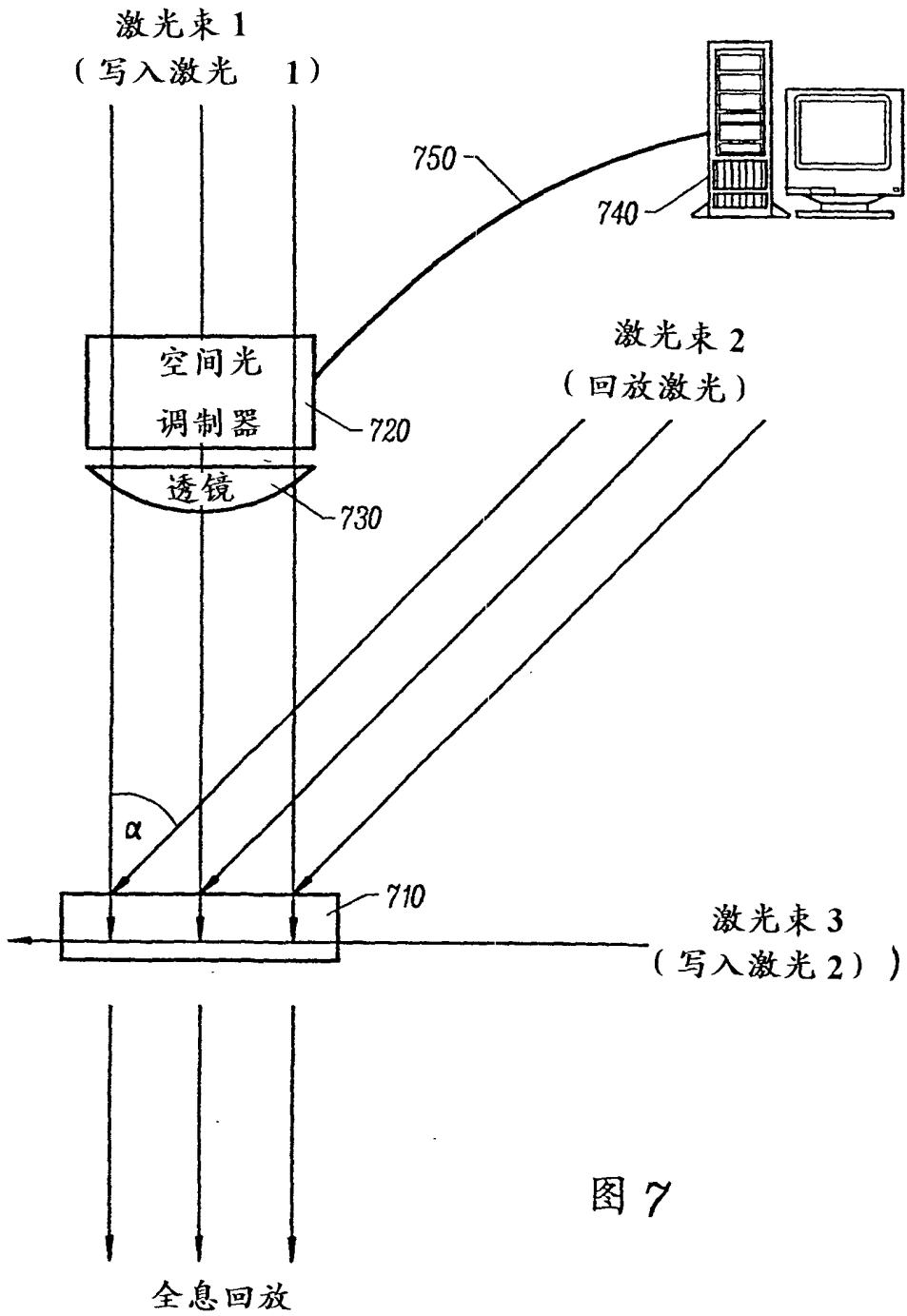


图 7

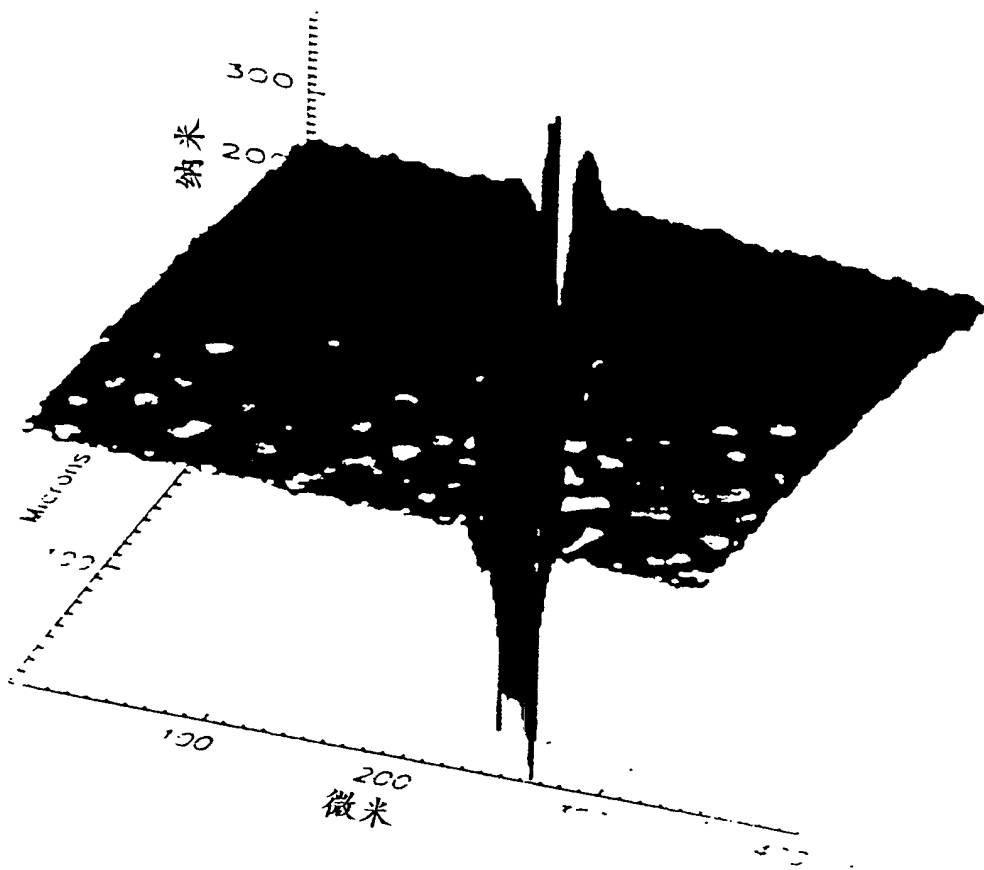


图 6

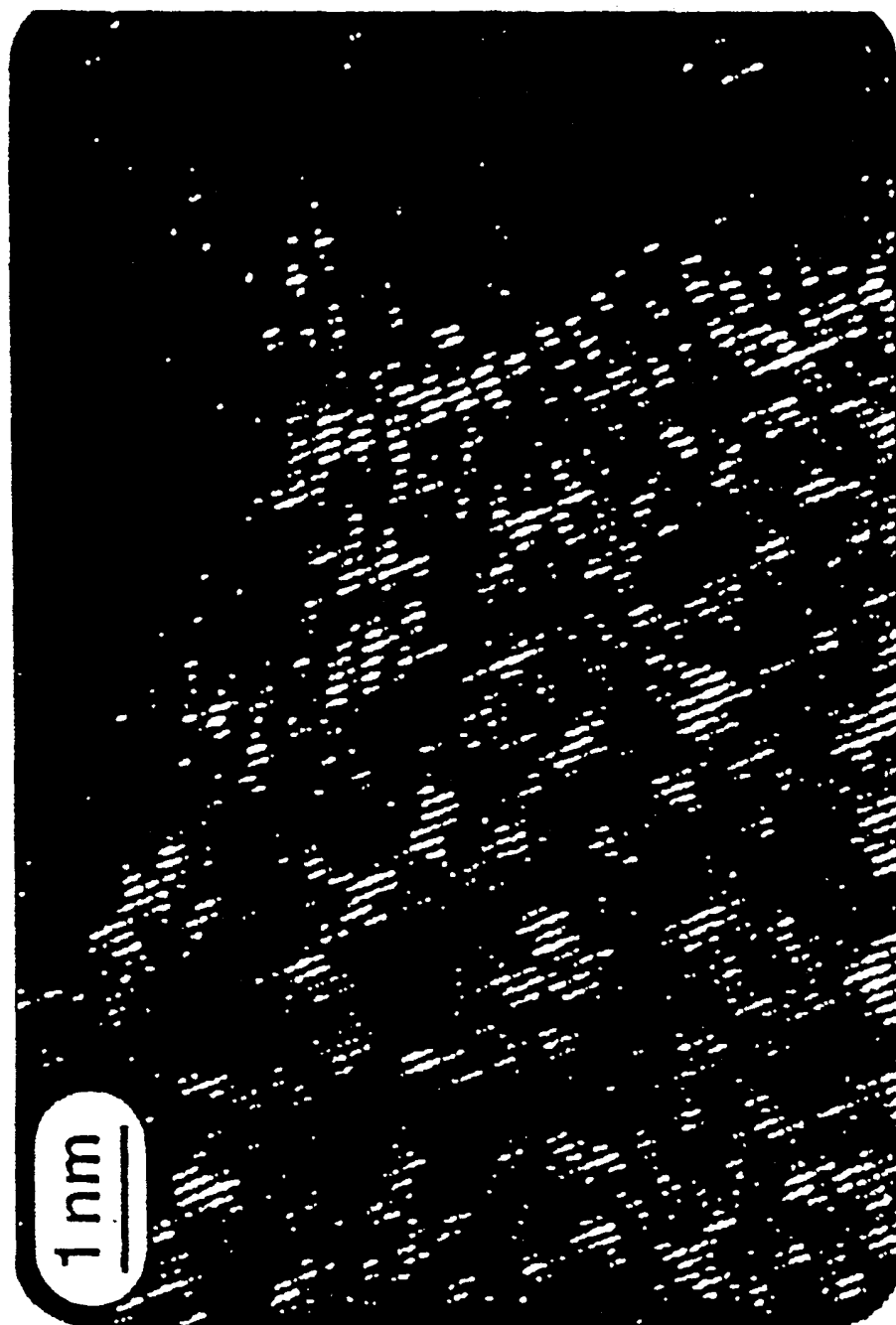


图8



图9

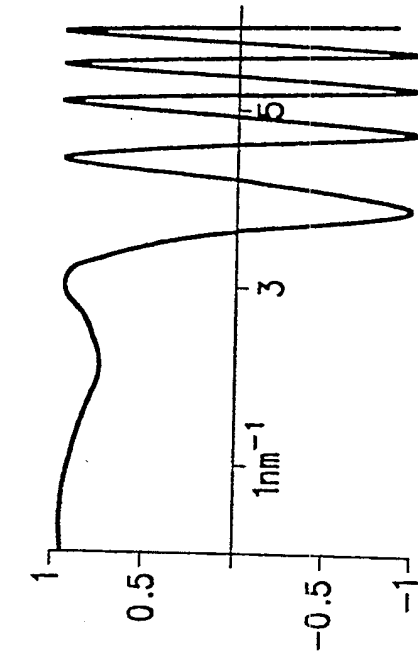


图 10A

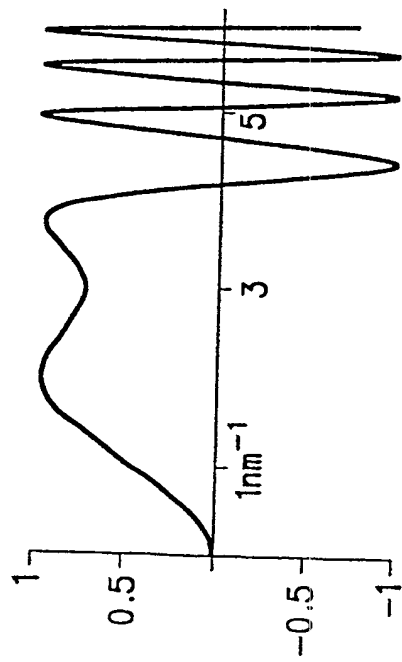


图 10B

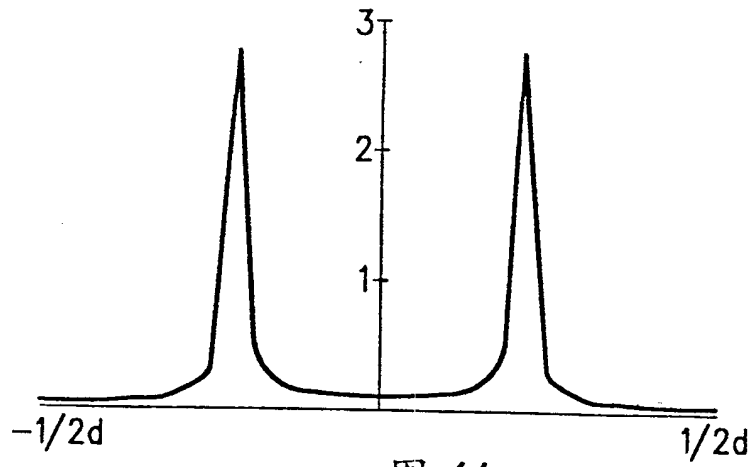


图 11

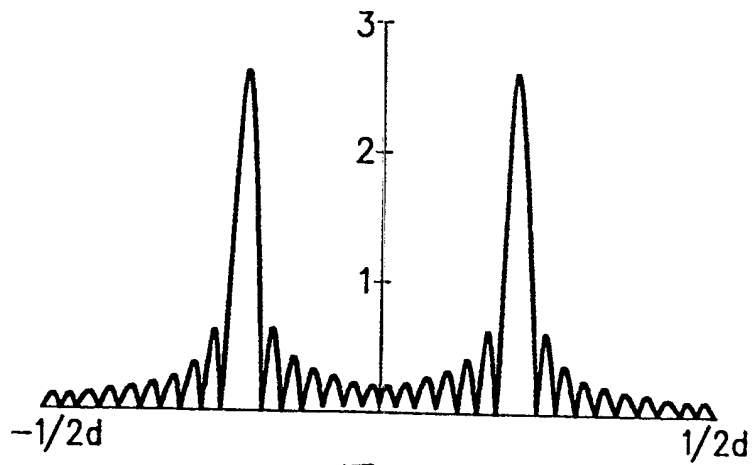


图 12

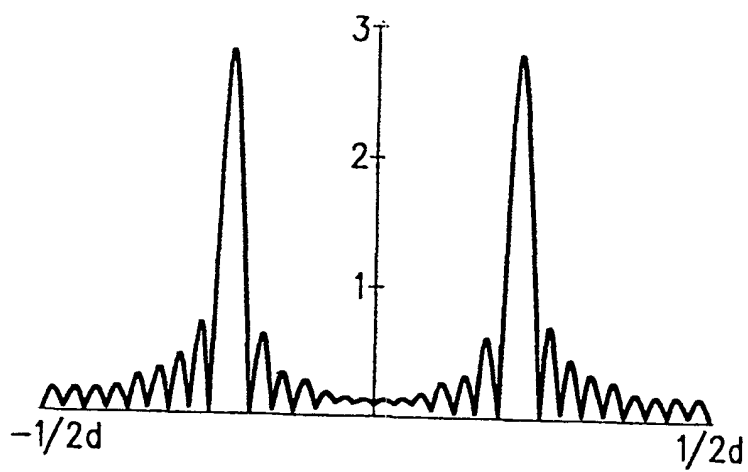


图 13

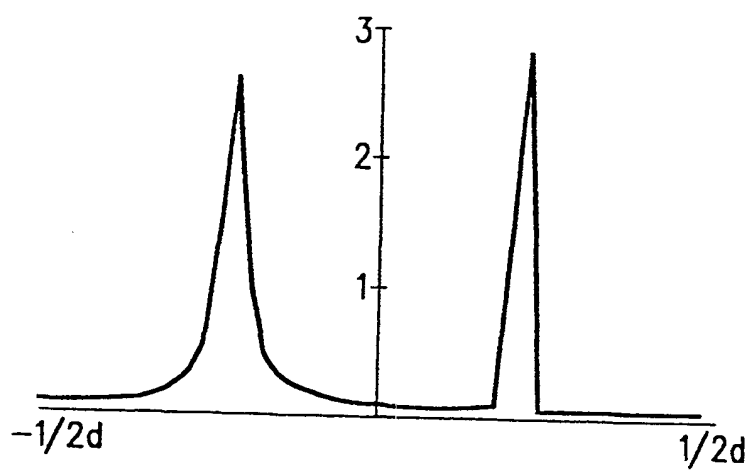


图 14

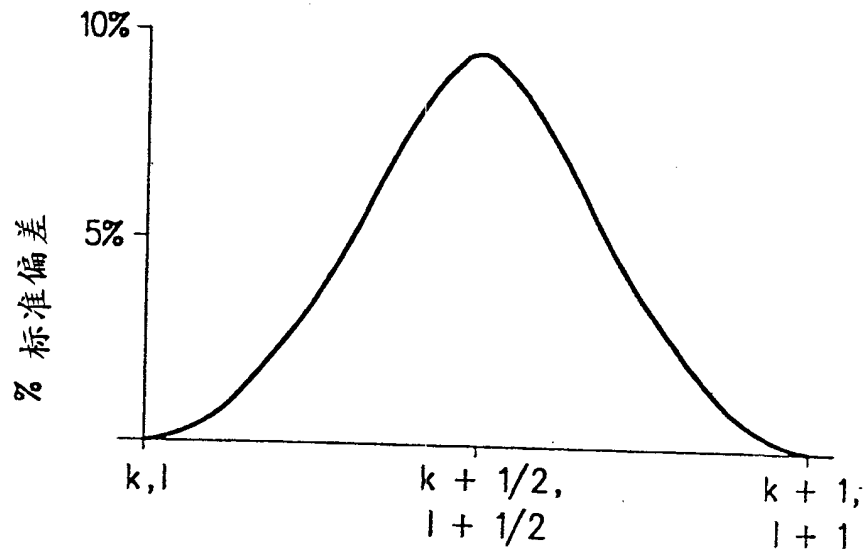


图 15

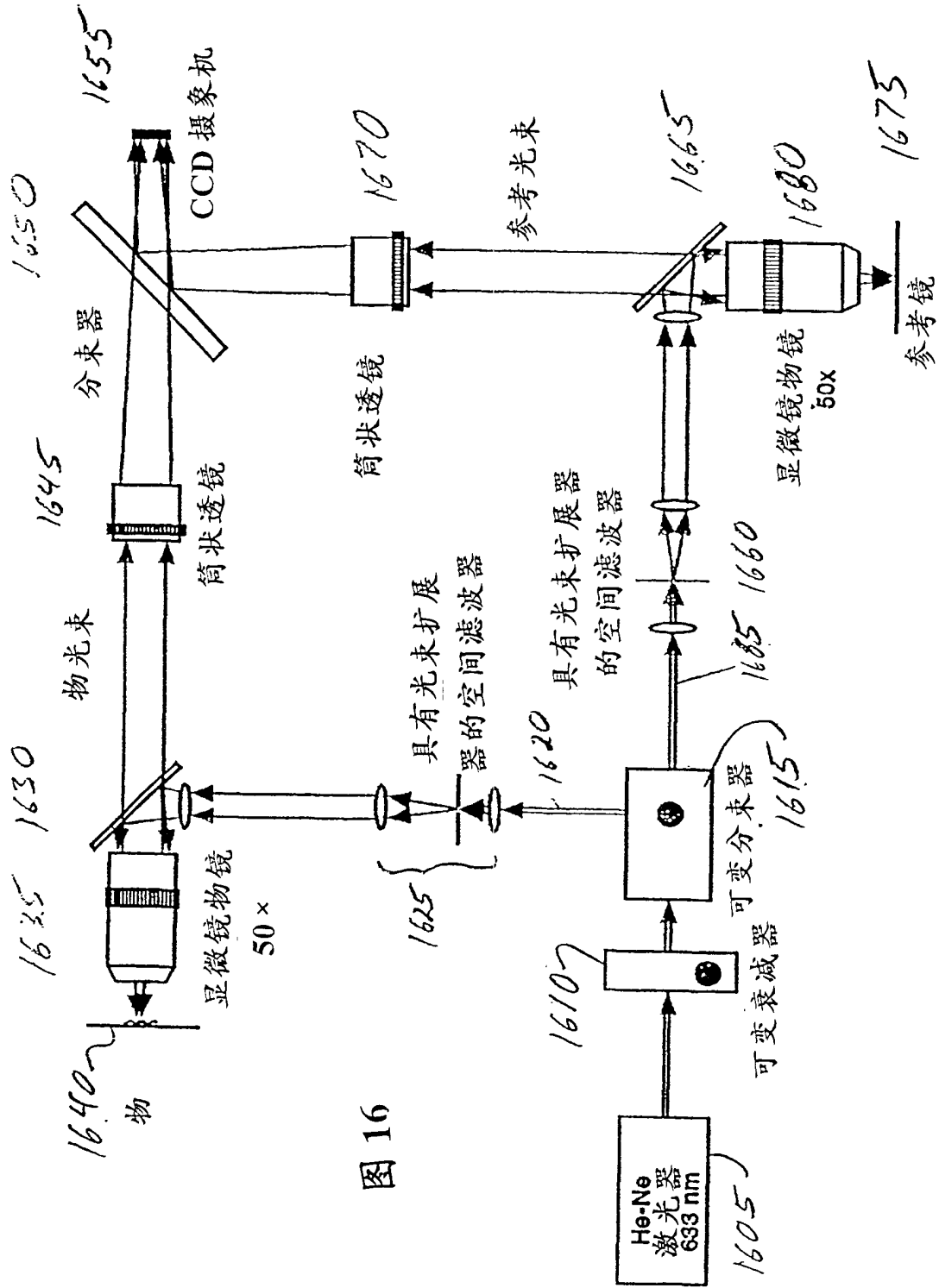


图 16

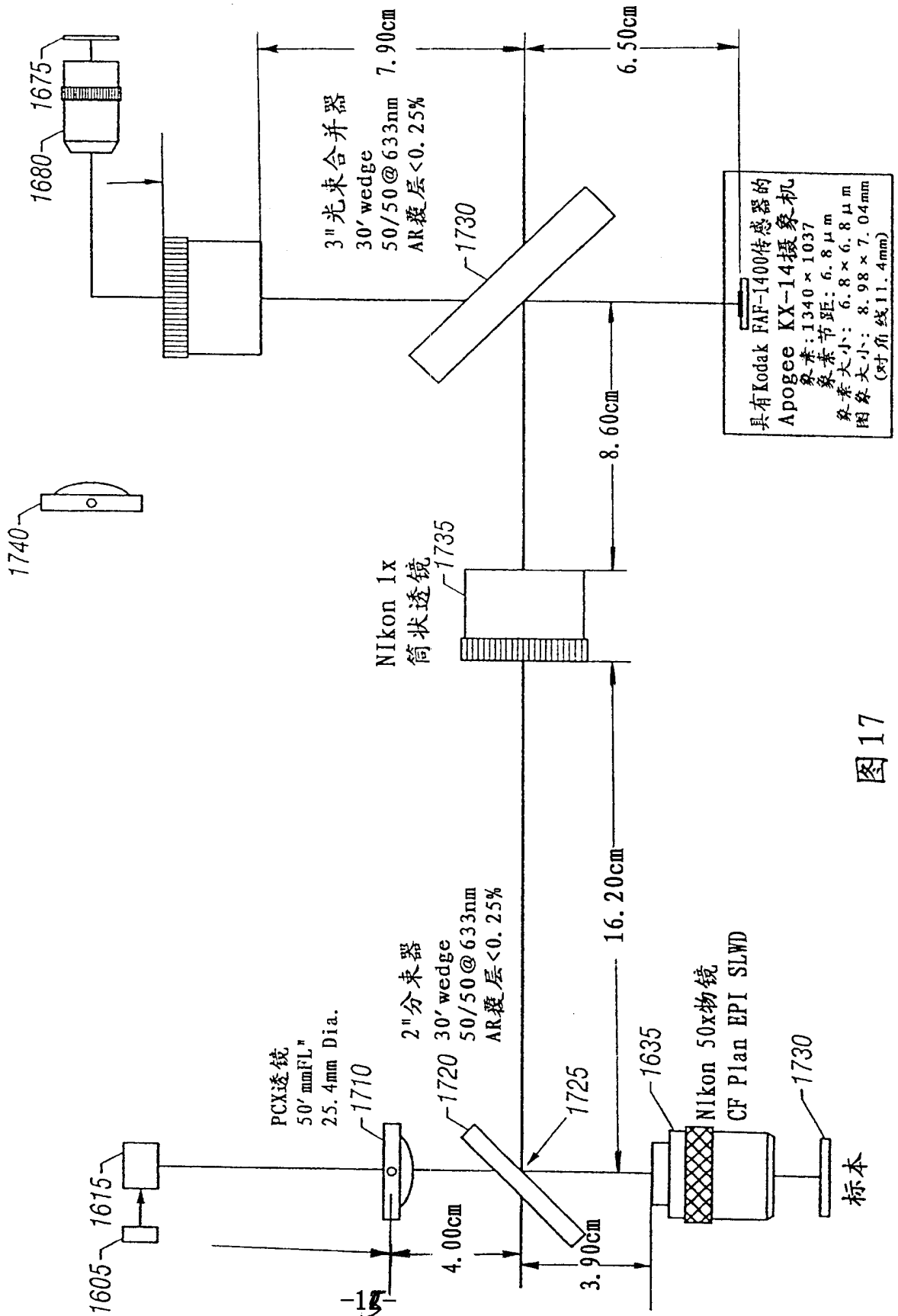
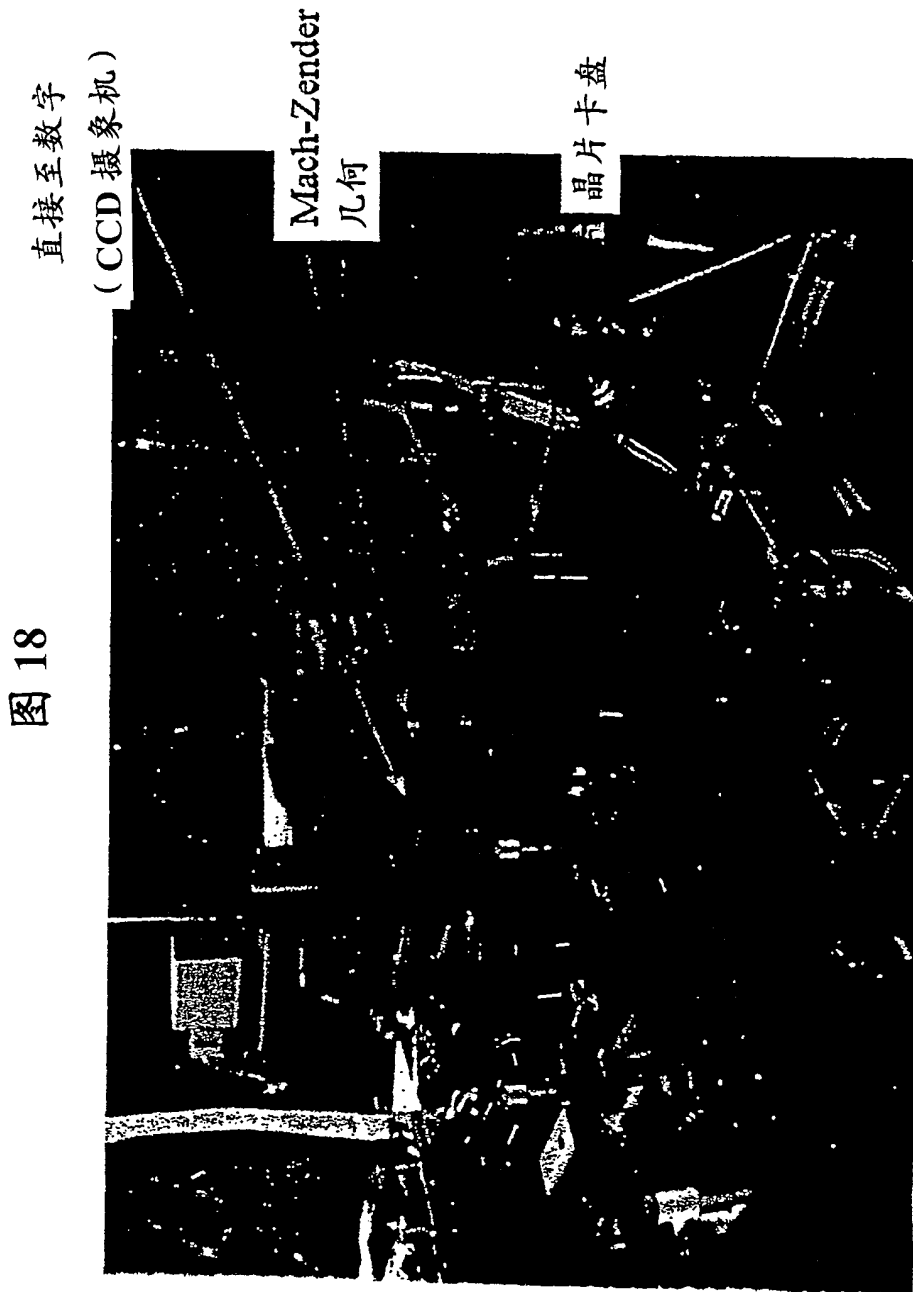


图17



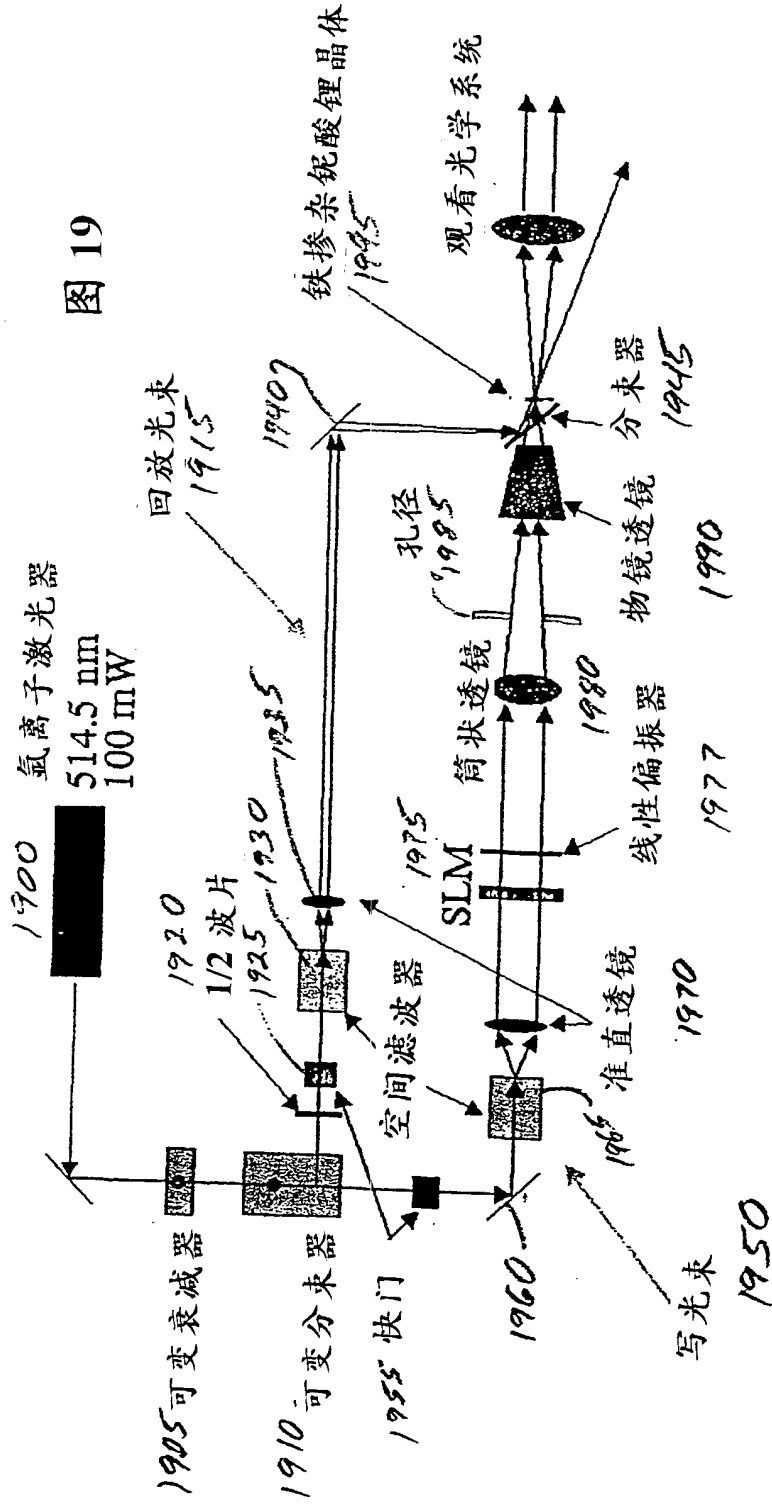


图 20

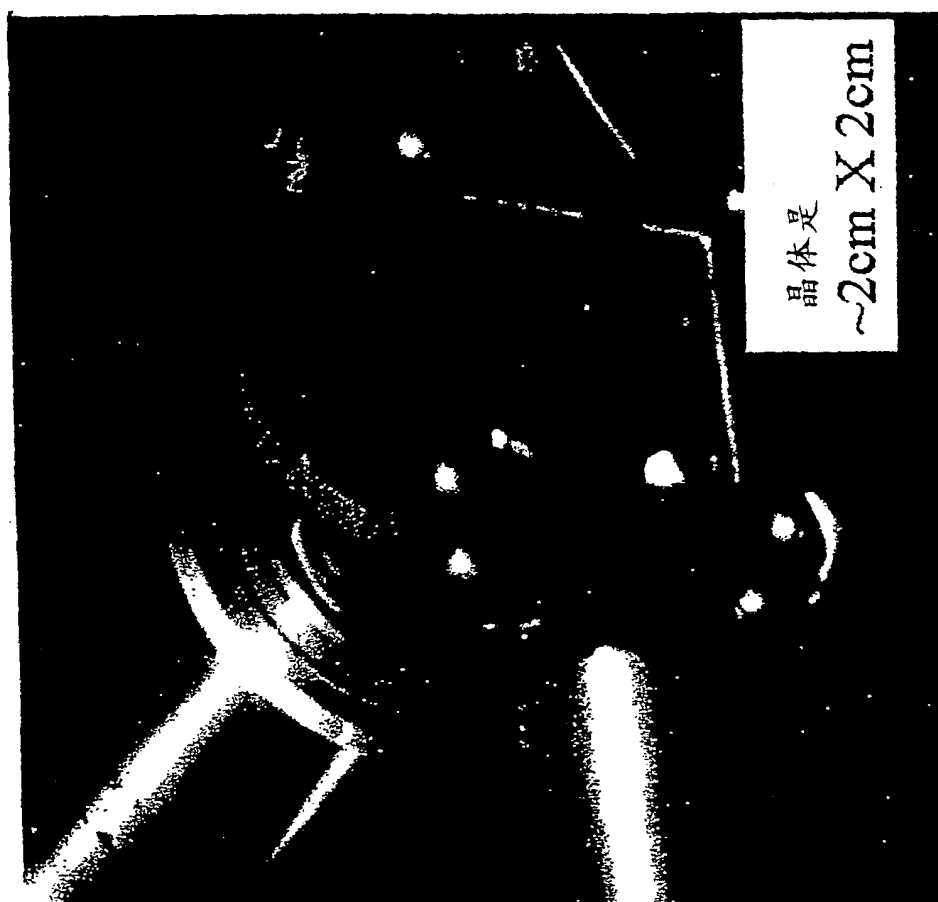


图 21A

透射

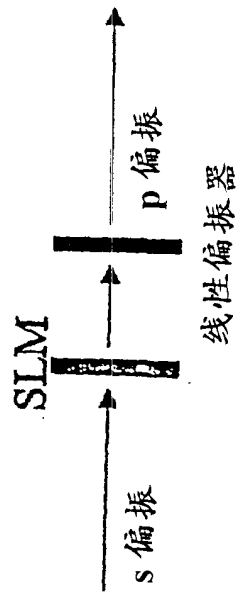


图 21B

反射

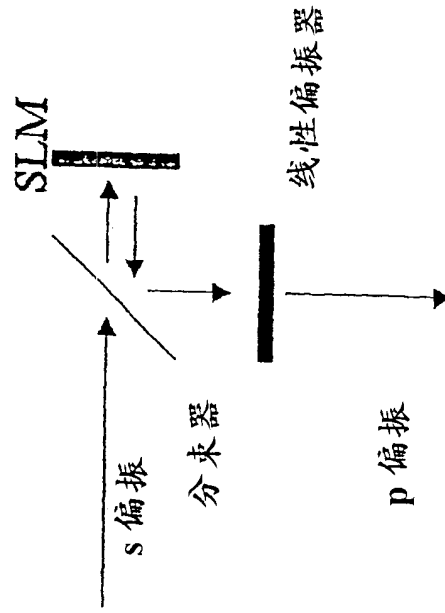
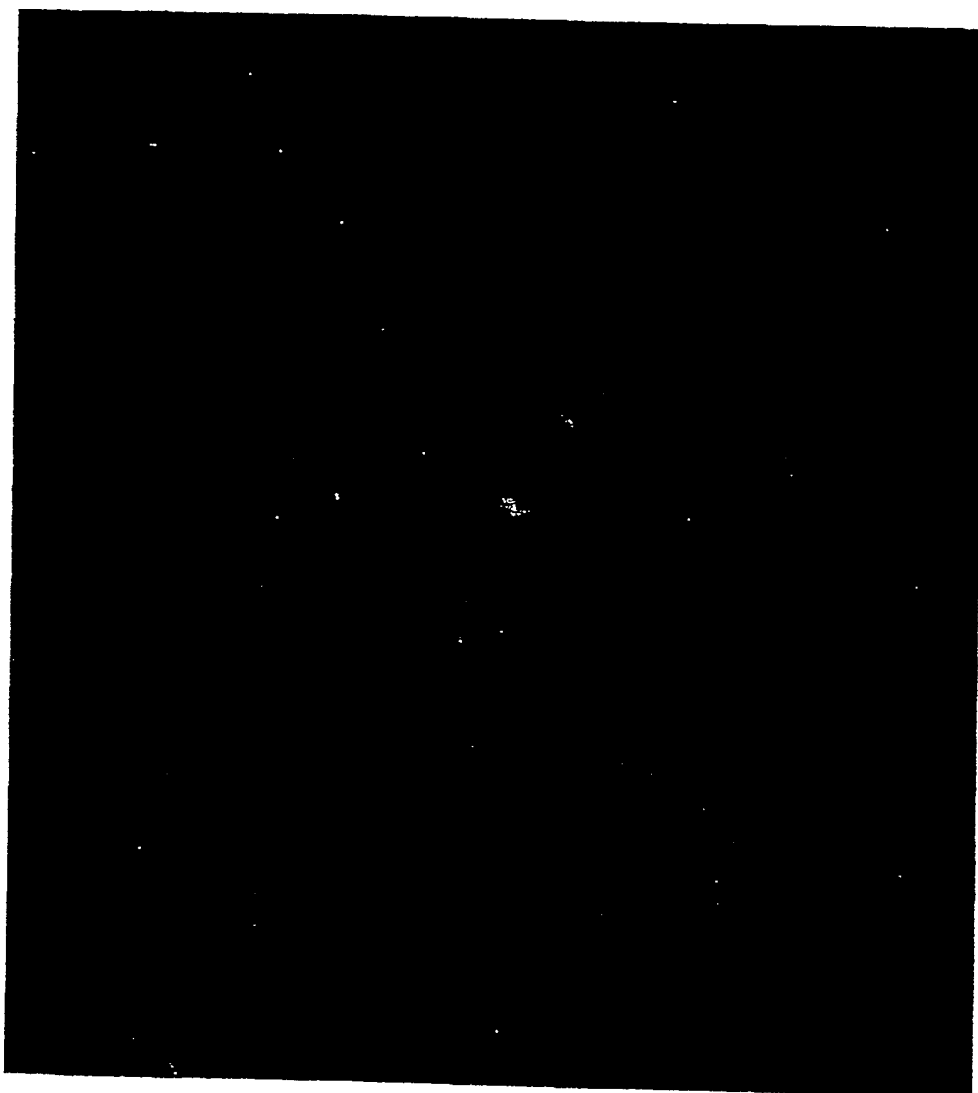


图 22



图 23



Mach-Zender 偏振分束器

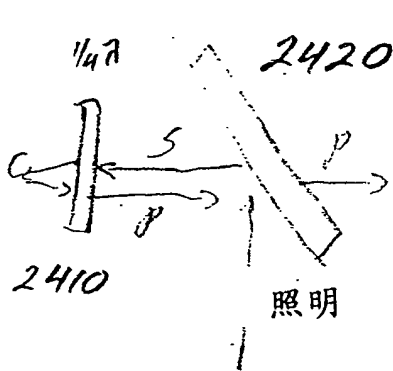


图 24A

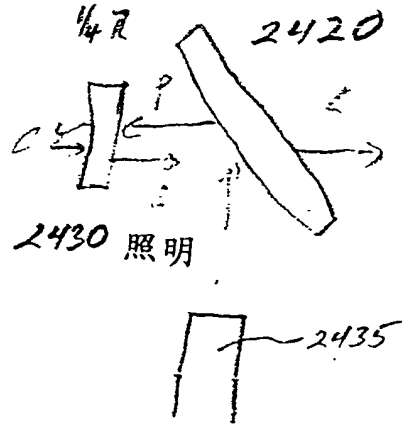


图 24B

前表面偏振分束器

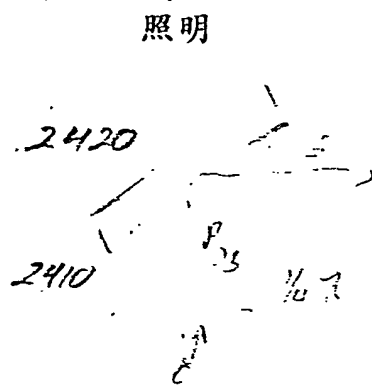


图 24C

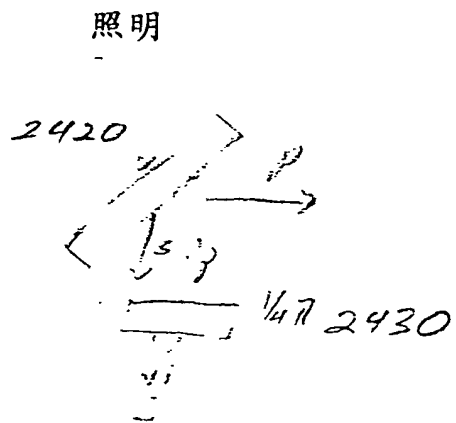


图 24D