

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl.

G01D 5/38 (2006.01)

G01D 5/245 (2006.01)

G02B 27/44 (2006.01)



[12] 发明专利说明书

专利号 ZL 02821930.9

[45] 授权公告日 2007 年 1 月 3 日

[11] 授权公告号 CN 1293367C

[22] 申请日 2002.8.12 [21] 申请号 02821930.9

[30] 优先权

[32] 2001.8.30 [33] US [31] 60/316,160

[86] 国际申请 PCT/US2002/025446 2002.8.12

[87] 国际公布 WO2003/021194 英 2003.3.13

[85] 进入国家阶段日期 2004.4.30

[73] 专利权人 GSI 集团公司

地址 美国密执安

[72] 发明人 威廉·G·索伯恩 诺曼·J·托比

梅尔文·J·J·特尔

道格拉斯·A·克林拜尔

拉尔夫·A·凯利埃尔

[56] 参考文献

CN1170139A 1998.1.14 G02B5/18

EP0895239A2 1999.2.3 G11B21/08

US5991249A 1999.11.23 G11B7/00

US5646730A 1997.7.8 G01B9/02

US5260568A 1993.11.9 G01D5/34

US5534693A 1996.7.9 H01J3/14

GB2246430A 1992.1.29 G01B11/00

US5559600A 1996.9.24 G01B9/02

CN1171560A 1998.1.28 G02B27/00

审查员 苏爱华

[74] 专利代理机构 永新专利商标代理有限公司

代理人 王 英

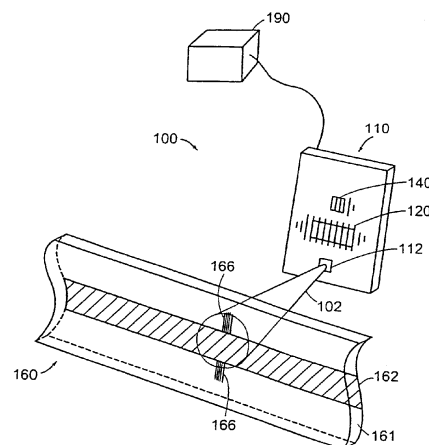
权利要求书 2 页 说明书 19 页 附图 9 页

[54] 发明名称

参考点泰伯编码器

[57] 摘要

本申请披露了一种光学编码器，包括标尺和探测头。该标尺包括一光学元件。该探测头包括均设置在基板上的光源、探测器阵列和标记探测器。标尺设置成与探测头相对，并且设置成可相对探测头移动。选择标尺与探测头之间的距离，使探测器阵列靠近 talbot 成像平面。光源发射朝向标尺引导的发散光束。光栅将发散光束的光朝向探测器阵列衍射。光学元件将发散光束的光朝向标记探测器衍射。探测器阵列对探测头相对标尺的位置进行测量。标记探测器提供探测头相对标尺的位置的参考测量。



1、一种光学编码器，包括：

A 一个标尺，该标尺包括光栅和光学元件；

B 探测头，该探测头包括均设置在基板上的光源和探测器阵列，标尺与探测头相对设置，并且标尺设置成可相对探测头移动，标尺与最靠近该标尺的 talbot 成像平面之间的距离等于 d ，探测头处于被第一平面和第二平面限定的区域内，第一平面与标尺之间分隔开的距离等于 n 倍 d 加上 d 倍 x ，第二平面与标尺之间分隔开的距离等于 n 倍 d 减去 d 倍 x ， n 为整数， x 小于或等于 0.5，光源发射发散光束，发散光束朝向标尺射出，光栅将发散光束的光朝向探测器阵列衍射；

C 设置在标尺与探测头之间的掩模，该掩模设定有小孔，该掩模相对探测头保持固定，设计该小孔的大小并且设置成可防止光栅衍射的第 5 级光束到达探测器阵列。

2、如权利要求 1 所述的编码器，其中基板设有沟槽，光源或探测器阵列被设置在沟槽中。

3、如权利要求 1 所述的编码器，还包括设置在基板上的垫片，光源或探测器阵列被设置在垫片上。

4、如权利要求 1 所述的编码器，其中所述标记探测器包括一个中央光电探测器、左光电探测器和右光电探测器。

5、如权利要求 1 所述的编码器，其中 x 小于或等于 0.2。

6、如权利要求 1 所述的编码器，其中 x 小于或等于 0.1。

7、如权利要求 4 所述的编码器，还包括用于产生第一信号的处理

电路,第一信号代表中央光电探测器产生的输出信号的两倍减去左和右光电探测器产生的输出信号的和得到的差值。

8、如权利要求 7 所述的编码器,其中所述处理电路还产生第二信号,该第二信号代表第一信号的负一倍。

9、如权利要求 8 所述的编码器,其中所述处理电路还产生标记信号,当第一信号大于第二信号加上偏离值时,该标记信号等于第一值,否则该第一信号等于第二值。

10、如权利要求 4 所述的编码器,其中该中央光电探测器包括多于一个的光电探测器。

参考点泰伯编码器

相关申请参考

本申请涉及转让给本申请受让人的、与本申请同时提交的题为“谐波抑制光电探测器阵列（HARMONIC SUPPRESSING PHOTODETECTOR ARRAY）”[代理人案卷号 No. MCE-018（111390—140）]的正在审查的序列号为 No.60/316,121 的美国专利申请。该申请全文在此引作参考。

背景技术

本申请涉及一种光学编码器。具体而言，本发明涉及一种改进的参考点光学编码器。

衍射光学编码器在位移检测系统领域中是众所周知的。可从本发明受让人以及从多个其他厂家购得这种装置。美国专利 No.5,559,600 和 5,646,730 描述了已知的光学编码器的例子。

最近的发展趋势是开发缩小尺寸的基于衍射的编码器。美国专利 No.5,995,229；5,671,052；5,909,283；和 5,991,249 披露了这种缩小尺寸的编码器的例子。通常，这种缩小了尺寸的编码器的特征在于，其使用准单色（或近单色）固态光源，二元光栅，一个或多个检测元件，和少量其他光学元件。

这种已知的缩小了尺寸的编码器的一个问题在于，尺寸减小常常对其精度造成负面影响。因此，需要一种特点在于精度有所提高的且缩小了尺寸的衍射光学编码器。

发明内容

通过一种改进的衍射光学编码器，可以实现上述这些和其他目的。该编码器可以包括用于提供参考位置测量的标记（index）探测器。该标记探测器可以使用三单元（tri-cell）结构来实现。本发明还

提供对标记探测器所产生信号进行处理的算法。本发明还具有用于提高衍射光学编码器精度的其他特征。

根据下面仅以说明本发明最佳模式的方式表示和描述了数个实施例的详细说明，对于本领域技术人员而言，本发明的其他目的和优点将显而易见。可想见，本发明也可以有其他的不同的实施方式，并且能够在多个方面对其多个细节进行变型，而所有变化均不会脱离本发明。因此，实质上将附图和说明视为例证性的，而非限制或限定性的，而在权利要求中指定本发明应用的范围。

附图简述

为了进一步理解本发明的性质和目的，将参照下面结合附图的详细说明，其中使用相同的附图标记表示相同或相似部分，其中：

图 1 表示根据本发明构成的衍射光学编码器的透视图；

图 2A 表示根据本发明构成的衍射光学编码器的侧视图；

图 2B 表示沿图 2A 中所示的线 2B-2B 方向作出的探测头的俯视图；

图 2C 表示沿图 2A 中所示的线 2C-2C 方向作出的标尺（scale）的视图；

图 2D 表示沿图 2A 中所示的线 2D-2D 方向作出的编码器的端（end）视图；

图 3A 表示根据本发明构成的衍射光学编码器中所使用的标尺的视图；

图 3B 和 3C 表示图 3A 中所示标尺的一部分的放大视图，表示根据本发明构成的衍射光学编码器可以使用的标尺的两种不同制造方法；

图 4 表示衍射光学编码器的侧视图，表示一些光束从标尺朝向探测头衍射；

图 5 表示在距标尺不同距离处的干涉条纹图案；

图 6 表示根据本发明构成的探测头的更详细的俯视图；

图 7 表示由本发明构成的编码器的标记检测器产生的原始信号

曲线，以及根据本发明所产生的与这些原始信号相应的信号曲线；

图 8 表示根据本发明构成的标记探测器的另一实施例；

图 9 表示根据本发明构成的衍射光学编码器的端视图，其中探测头相对标尺倾斜；

图 10A-10D 表示根据本发明用于使光源与标尺之间的光程长度，和标尺与探测器阵列之间的光程长度相等的不同方法；

图 11A 表示在根据本发明构成的光学编码器中，一些光束从标尺衍射至探测头；

图 11B 表示根据本发明构成的衍射光学编码器，其包括用于防止某些高级光束到达探测器阵列的掩模。

具体实施方式

图 1 表示根据本发明构成的衍射光学编码器 100 的透视图。如图所示，编码器 100 包括三个基本元件：光电组件或者探测头 110；标尺 160 和信号处理器 190。

图 2A 表示编码器 100 的侧视图。图 2B 表示沿图 2A 中所示线 2B-2B 方向作出的探测头 110 的视图。图 2C 表示沿图 2A 中所示线 2C-2C 方向作出的标尺 160 的视图。图 2D 表示沿图 2A 中所示线 2D-2D 方向作出的编码器 100 的端视图。为了便于说明，在图 2A-2D 中没有表示出信号处理器 190。

参照图 1 和 2A-2D，探测头 110 包括光源 112，主探测器阵列 120，以及标记或参考点探测器 140。如图所示，光源 112 和探测器 120、140 均安装在同一基板 111 上。最好在硅单片上实现主探测器阵列 120 和标记探测器 140。标尺 160 包括基板 161，基板 161 上设置有一衍射光栅 162 和两个衍射光学元件（DOE）166。标尺 160 通常与探测头 110 相对设置，使二者分隔开固定距离 d （如图 2D 中所示），从而标尺 160 和探测头 110 可以沿图 2A 中箭头 A-A 所示的方向彼此相对移动。在使用过程中，编码器 100 监测标尺 160 相对探测头 110 的移动（沿箭头 A-A 方向），并产生代表标尺 160 相对探测头 110 的位置的信号。

在使用时,光源 112 发射扩展或发散光锥 102。光源 112 最好为准单色光(或者近单色光)源,并且可以使用垂直腔表面发射激光器(VCSEL)来实现。如图 1 中所示,最好将探测头 110 和标尺 160 设置成,当光锥 102 到达标尺 160 时,光锥 102 足够宽以便入射在一部分光栅 162 及其中一个 DOE 166 上。光锥 102 中的一部分光通过标尺 160 传播,并被标尺 160 衍射,并且这部分光最好不返回探测头 110。而且,光锥 102 中的一些光被反射,并且向回衍射至探测头 110。探测头 110 和标尺 160 最好设计成使(1)从光栅 162 朝向探测头 110 向回衍射的光,主要入射在探测器阵列 120 上,并且(2)从 DOE 166 向回朝向探测头 110 衍射的光主要入射在标记探测器 140 上。正如下面更为详细的讨论中所述,入射在探测器阵列 120 上的光,使编码器 100 提供探测头 110 相对标尺 160 位置的相对测量,而入射在标记探测器 140 上的光,使编码器 100 提供探测头 110 相对标尺 160 位置的标记点测量或者参考点测量。

图 3A, 3B 和 3C 更详细地表示出标尺 160。具体而言,图 3B 和 3C 表示图 3A 中所示区域 310 的放大视图。标尺 160 最好形成在玻璃状基板 161 上。光栅 162 可以由反光条 164 与透光条 163 交替构成,如图 3B 中所示。最好通过用高反射材料涂覆基板 161 的一些区域来形成反光条 164。在本实施例中,通过不涂覆基板 161 而简单地形成透光条 163。或者,可以使用光吸收条取代透光条。如图 3C 中所示,在另一实施例中,条可以都是反射性的,并且可以将交替的条设置成不同深度。图 3B 中所示类型的光栅 162 称作“振幅光栅”。图 3C 中所示类型的光栅 162 称作“相位光栅”。

无论是如图 3B 还是如图 3C 所示构成光栅 162,每一条最好是细矩形,其短边平行于标尺的位移方向(即,平行于图 1 中所示的箭头 A-A)。条纹中心到中心的距离(或者如图 3B 和 3C 中所示,条纹左边缘到左边缘的间隔)定义为光栅 162 的周期 P。最好,条纹是等间距的,并且每一条纹的短边尺寸基本上等于光栅 162 周期 P 的一半。根据所需的系统性能,周期 P 一般在 5 至 40 微米之间,优选数值为 20 微米。理想情况下,在标尺两侧的暴露玻璃区域上,将标尺进行

抗反射涂覆。

回到图 1，光栅 162 将来自光锥 102 的光衍射成朝向探测头 110 引导的多个光锥。图 4 表示出与图 2A 中所示具有相同取向的编码器 100 的视图，图 4 表示光栅 162 将一些光锥 103 朝向探测头衍射。衍射光锥 103 彼此发生光学干涉，在标尺 160 与探测头 110 之间的空间中产生复杂的条纹状图案。

图 5 示意地表示距离光栅 162 不同距离处，由衍射光锥 103 之间的干涉所形成的干涉条纹的强度。如图所示，在距光栅 162 的距离为 d_2 和 d_4 处，光锥 103 之间干涉产生的光学条纹图案是一种具有相对较高对比度的周期性图案。相反，在距光栅 162 的距离 d_1 和 d_3 处，光学条纹图案具有相对较低对比度。可以将距光栅 162 距离为 d_2 和 d_4 的平面称作自成像平面，或“泰伯（或 talbot）成像平面”。在这些 talbot 成像平面处，发射的衍射光锥具有与其在光栅处相同的相对相位，必然形成光栅 162 的自身的图像。正如美国专利 No.5,991,249 中泛泛提到的，这些高对比度成像平面有规律地出现，并且可以根据下面的公式（1）计算光栅与任一成像平面之间的距离。

$$\frac{z_0 z_1}{(z_0 + z_1)} = \frac{NP^2}{\lambda} \quad (1)$$

在公式（1）中， z_0 等于光源 112 与光栅 162 之间的距离， z_1 等于光栅 162 与 talbot 自成像平面之间的距离， N 为整数， P 为光栅周期， λ 为光源 112 所发射的光波长。

如图 5 中所示，第一 talbot 平面（距标尺距离为 d_2 处）与第二 talbot 平面（距标尺距离为 d_4 处）相位相差 180 度。通常，相邻 talbot 平面彼此有 180 度的异相。相邻 talbot 平面之间这种 180 度相位偏移的原因，在于在偶数平面（即 N 等于偶数的 talbot 平面），所有各级衍射光具有其在光栅处的相同相对相位，而在奇数平面（即 N 等于奇数的 talbot 平面）处，0 级衍射光 180 度异相，所有其他各级具有与其在光栅处相同的相对相位。

应当注意，图 5 中所示的图案第 0 级光束对图案有贡献时产生的条纹图案的特性曲线（例如当 0 级，正 1 级，负 1 级，以及具有其他

更高级的衍射光束之间相互作用形成条纹图案时)。如果消除 0 级光束, 则条纹图案看起来将与图 5 中所示的明显不同。具体而言, 在具有 $1/2$ 波长延迟的相位光栅情形中, 较低对比度平面为 Talbot 成像平面, 较高对比度平面处于 Talbot 成像平面之间。在较高对比度区域中, 条纹图案不像振幅光栅的情形那样显示原始光栅的图像。实际上, 相位光栅的条纹图案通常是谐波成份的复杂组合, 其中主要为周期通常为图 5 中 talbot 平面中所示周期一半的成分。与振幅光栅的情况相同, 来自相位光栅的条纹图案的周期以与距标尺的距离成正比例地增加。通常, 难以预知相位光栅条纹图案将表现出最小谐波失真和/或噪声的平面。

因此, 可以认为消除 0 级光束会导致编码器所监测的周期信号降质。不过, 由于至少下述原因, 设计其中消除了 0 级光束的编码器依然是有利的: 一个实际的原因是, 在本发明的编码器设计中, 通过传播快速滤除更高衍射级, 并且所产生的条纹图案常常接近于纯正弦曲线形。

尽管相位光栅具有上述优点, 不过本发明的优选光栅为振幅光栅。振幅光栅(如图 3B 中所示)比相位光栅(如图 3C 中所示)具有更广的商业来源。由于振幅光栅价格更为低廉, 并且通常易于获得标尺, 从而, 设计使用振幅光栅的编码器是有利的。不过, 使用振幅光栅即意味着存在 0 级光束。现在将讨论存在 0 级光束的编码器的设计。

在根据本发明构成的编码器中, 探测头 110 和标尺 160 最好设置成, 使探测器阵列 120 处于其中一个 talbot 成像平面中(即, 标尺与探测器阵列探测平面之间的距离等于根据上述公式(1)计算出的 z_1)。正如由图 2A 和 2D 中显而易见的, 在根据本发明构成的编码器中, 光源 112 的上发光表面最好大体上与探测器阵列 120 的上表面或探测表面共面。从而, 在根据本发明构成的编码器中, 距离 z_0 基本等于距离 z_1 。在 z_0 等于距离 z_1 的情形中, 上述公式(1)简化为下述公式(2)。

$$z_0 = \frac{2NP^2}{\lambda} \quad (2)$$

从而，为了保证探测器阵列 120 处于一个 talbot 成像平面中，在根据本发明构成的编码器中，最好可以调节探测头 110 与标尺 160 之间的距离 d （如图 2D 中所示），使标尺 160 与探测器阵列 120 之间的间隔基本等于用某些整数值 N 由公式（2）计算出的 z_0 。不过，由于几乎不可能保证标尺 160 与探测器阵列 120 之间的实际距离精确地等于 z_0 ，最好选择该距离以使探测器阵列 120 的探测表面处于靠近一个 talbot 平面的区域。现在将讨论该区域的所需尺寸。

如图 5 中所示，标尺与第一 talbot 平面之间的距离为 d_2 。此外，标尺与第 n 个 talbot 平面之间的距离为 nd_2 （即， d_2 的 n 倍）。如果希望将探测器阵列设置在第 n 个 talbot 平面处，则标尺与探测器阵列之间的距离最好等于 nd_2 加或减 $0.5d_2$ 。从而例如，如果希望将探测器阵列设置在第三 talbot 平面处，则应当将探测器阵列放置在从距标尺 $2.5d_2$ 到距标尺 $3.5d_2$ 的区域内。继续使用该例，如果标尺与探测器阵列之间的间隔等于 $3.0d_2$ ，则探测器阵列将正好处于第三 talbot 平面中。如果该距离稍大于或者稍小于 $3.0d_2$ ，则干涉条纹图案的对比度将稍小于最佳值，并且编码器的精度也相应地稍有减小。当探测器阵列从所需位置 $3.0d_2$ 进一步移动时，干涉条纹图案的对比度将持续减小，直至在距离 $2.5d_2$ 或 $3.5d_2$ 处对比度达到最小数值（即在这些位置处对比度将为最小值，因为 talbot 平面由以最小对比度为特征的均匀间隔的平面分隔开）。由于 talbot 平面被最小对比度的均匀间隔的平面分隔开，则 nd_2 加或减 $0.5d_2$ 表示探测器阵列将要放置的范围的最大尺寸。如果探测器阵列处于距标尺 nd_2 加或减 $0.2d_2$ 的位置，则编码器的性能将增强，并且如果探测器阵列设置在距标尺 nd_2 加或减 $0.1d_2$ 的位置，则编码器的性能将进一步增强。更普遍地是，探测器阵列 120 最好处于由两个平面所限定的区域内，其中第一平面与标尺间隔 nd_2 加上 xd_2 ，第二平面与标尺间隔 nd_2 减去 xd_2 ，其中 x 小于或等于 0.5。 x 的优选值为 0.2， x 的更优选值为 0.1。

如上所述，如果消除 0 级光束，则无论探测器阵列与标尺之间的

间隔如何,高对比度干涉条纹图案均可以入射到探测器阵列上。因此,通过使用具有基本消除了0级光束的相位光栅(如图3C中所示)的标尺,可有利于减轻上面所讨论的对探测器阵列与标尺之间间隔的限制。在本实施例中,上部条(upper stripe)与下部(lower stripe)条之间的距离(或者下部条的深度)最好大体等于光源112所产生光的四分之一波长的N倍,其中N为奇数。使用这种相位光栅的另一个优点在于,其将光学干涉条纹图案的周期减小了两倍,从而可将编码器的分辨率增大两倍。或者,如果希望制造使用存在0级光束的相位光栅的编码器,则上部条与下部条之间的距离最好基本等于光源112所产生光的四分之一波长的(N+x)倍,其中N为奇数,并且x为小于0.5的小数。

如图5中所示,干涉条纹是周期性的,并且以周期T为特征。由于用扩展光锥照射光栅162,条纹的周期T通常是距光栅距离的函数,如下面的公式(3)中所示。

$$T = \frac{(z_0 + z_1) * P}{z_0} = \frac{(2z_0 + e) * P}{z_0} = KP \quad (3)$$

在公式(3)中, z_0 为光源112与标尺160之间的光程长度, z_1 为标尺与探测器阵列120之间的光程长度,P为光栅周期,e为光源112与探测器阵列120之间的偏离(即 z_0 与 z_1 之差),K为比例因子。

如从公式(3)可以看出,在光源与光栅之间的距离(z_0)等于探测器阵列与光栅之间的距离(z_1)(即e为零)的特殊情况下,比例因子K为2,从而干涉条纹的周期T一般等于恒定数值,该恒定数值为光栅周期P的两倍(即 $T=2P$)。因为,如上所述,在根据本发明构成的编码器中,光源112的上发光面优选为基本与探测器阵列120共面,光源与光栅之间的距离(z_0)基本等于光栅与探测器阵列之间的距离(z_1)。因此,在编码器100中,入射在探测器阵列120上的干涉条纹的周期T常常基本等于常数2P。

在使用时,标尺160沿图2A中所示箭头A-A的方向相对探测头110移动,引起入射在探测器阵列120上的干涉条纹图案沿箭头A-A的方向横跨探测器阵列120而移动。所入射的干涉条纹图案横跨探测

器阵列上移动, 相当于改变入射干涉条纹图案与探测器阵列之间的相角。探测器阵列 120 和相关的信号处理器 190 监测该相角, 从而监测探测头 110 相对标尺 160 的位置。

最好将探测器阵列 120 构造成一种光电探测器阵列, 以便于测量探测器阵列与入射在探测器阵列上的干涉条纹图案之间的相角。上面引作参考的正在审查中的, 序列号为 No.60/316,121, 题为“谐波抑制光电探测器阵列(HARMONIC SUPPRESSING PHOTODETECTOR ARRAY)”[代理人案卷号为 No.MCE-018 (111390-140)]的美国专利申请, 公开了可以用作探测器阵列 120 的多种探测器阵列。不过, 任何可以能测量阵列与入射干涉条纹图案之间相角的探测器阵列都可用作阵列 120。探测器阵列 120 产生的输出信号施加给信号处理器 190。信号处理器 190 最好产生代表阵列 120 与入射在阵列 120 上的干涉条纹图案之间相角的输出信号。

图 6 表示与图 2B 中所示类似的探测头 110 的俯视图, 不过图 6 示出附加细节。如图所示, 探测器阵列 120 包括多个矩形光电探测器, 其中的每一个光电探测器具有沿线 L-L 方向(即沿光电探测器长度方向)延伸的长轴, 和沿线 W-W 方向(即沿光电探测器宽度方向)延伸的短轴。探测器阵列 120 最好设计成使用 4-bin 算法, 从而阵列中的光电探测器最好与四个焊片 121 有电连接。处理电路 190(未示出)与焊片 121 有电连接, 以允许监测阵列 120。光源 112 最好与两个焊片 113 有电连接, 并由施加给两个焊片 113 的电信号控制。图 6 中还示出 VCSEL 112 的小孔 114, VCSEL 发射的所有光都能通过小孔 114。

如图 6 中所示, 最好由三单元结构构成标记探测器 140, 其包括一中央光电探测器 142 和设置在该中央光电探测器 142 两侧的两个端部光电探测器 144。中央光电探测器 142 与焊片 143 有电连接。每个端部光电探测器 144 都电连接到焊片 145 上。处理电路 190(图 6 中未示出)与焊片 143、145 电连接, 以允许监测标记探测器 140。中央探测器 142 最好对准光源 112, 使从小孔 114 平行于线 L-L 延伸出的直线可平分该中央探测器 142。

参照图 1, 由光源 112 发射的发散光锥 102 照亮 DOE 166。显然, 当标尺 160 与探测头 110 沿图 2A 中所示箭头 A-A 方向彼此相对移动时, DOE 166 将移入和移出光锥 102。当光源 102 照亮 DOE 166 时, DOE 166 将光锥 102 的光朝向标记探测器 140 衍射。最好使用变形波带片透镜构成 DOE 166。当被光源 102 照射时, DOE 166 最好产生光源 112 的“线成像 (line image)”。即, DOE 166 最好将“光线”向回朝向标记探测器 140 衍射。DOE 166 所产生的并入射在探测头 110 上的线成像, 最好基本平行于图 6 中所示的线 L-L。

为了清楚起见, 图 1 中的标尺 160 中仅表示出一个 DOE 166。不过, 如图 2C 和 3A 中所示, 标尺 160 可以包括设置在光栅 162 两侧的两个 DOE 166。到达标尺 160 的光锥 102 最好足够大, 以便照射光栅 162 的一部分以及仅仅一个 DOE 166。不过, 如果标尺 160 上包括两个 DOE 166, 则在形成编码器 100 时, 可以不考虑取向而将标尺 160 与探测头 110 组装在一起。也就是说, 如果标尺 160 包括两个 DOE 166, 则无论标尺 160 是否头朝上或者头朝下安装, 光锥 102 都将照射到一个 DOE 166 上。当然也可以只使用一个 DOE 166 构成标尺 160。此外, 标尺 160 也可以包括两个非对称设置的 DOE 166 (例如, 一个 DOE 可以设置在标尺中心附近, 另一个 DOE 可以设置在标尺端部附近)。

在使用中, 当标尺 160 与探测头 110 彼此相对移动时 (沿图 2A 中所示直线 A-A 的方向), DOE 166 产生的线成像将扫过标记探测器 140。标尺 160 沿线 A-A 方向相对探测头 110 移动距离 D , 则使 DOE 166 产生的线成像横跨探测头 110 移动的距离等于 KD , 其中 K 为从公式 3 得出的比例因子。从而, 对于 e 为零的情形 (即如公式 (3) 中所示, z_0 等于 z_1), 当标尺 160 相对探测头 110 移动时, DOE 166 产生的线成像以两倍于标尺移动速度的速度横跨探测头 110 而移动。只有当 DOE 166 正好处于光源 112 照射下时 (即当如图 1 中所示构造编码器时), DOE 166 所产生的线成像将处于标记探测器 140 的中央光电探测器 142 的中心。处理电路 190 产生代表入射在标记探测器 140 上的光的输出信号。该输出信号可以称作标记信号。优选地, 每

次 DOE 166 产生的线成像扫过标记探测器 140 时, 标记信号为一个脉冲。显然, 该脉冲为测量标尺 160 与探测头 110 的相对取向提供了标记点或参考点测量。由于入射在阵列 120 上的干涉条纹图案是周期性信号, 因而对探测器阵列 120 所产生的标尺 160 与探测头 110 之间距离或位移的测量, 是相对测量值。不过, 当光源 112, DOE 160 和标记探测器 140 均处于特定取向时, DOE 160 产生的线成像将只入射在标记探测器 140 上, 这就是标记信号提供参考测量值的原因。

处理电路 190 可以使用多种算法产生标记信号。最好, 处理电路 190 使用对标记探测器 140 所产生的输出信号的改变不敏感的算法, 这种改变可能是由光源强度变化, 杂散光, 以及探测头 110 与标尺 160 未对准引起的。优选地, 该标记信号的特征在于, 当由 DOE 166 衍射的线成像扫过标记探测器 140 时产生一脉冲, 并且该脉冲的宽度最好基本等于光栅 162 的周期 P 。这种脉冲宽度使脉冲可以唯一识别, 或者与光栅 162 所产生的一个干涉条纹图案相一致。在一个优选实施例中, 中央光电探测器 142 的宽度 (沿图 6 中所示直线 W-W 方向测量的) 基本等于光栅 162 周期 P 的两倍。在本实施例中, 只要 DOE 166 所产生的线成像的中心入射在中央光电探测器 142 上, 标记信号就优选为高, 并且在所有其他时刻优选为低。

图 7 表示, 当线成像 700 在阵列上沿箭头 702 所示的从左到右方向移动时, 标记探测器 140 所产生的输出信号的大体形状。曲线 A 表示, 当线成像 700 移过光电探测器时, 左端光电探测器 144 产生的输出信号的形状。曲线 B 表示, 当线成像 700 移过光电探测器时, 中央光电探测器 142 所产生的输出信号的形状。最后, 曲线 C 表示, 当线成像 700 移过光电探测器时, 右端光电探测器 144 所产生的输出信号的形状。由原始输出信号 A、B 和 C 产生标记信号的一种优选方法, 是处理电路 190 根据下面的公式 (4) 产生两个信号 S_1 和 S_2 。

$$S_1 = -A + 2B - C \quad (4)$$

$$S_2 = A - 2B + C$$

图 7 还表示出由图 7 中所示的原始信号 A、B 和 C 根据公式 (4) 产生的信号 S_1 和 S_2 。从公式 (4) 显然可以看出, 由于入射在标记探

测器 140 的所有三个光电探测器上的任何光都会被消除, 或者对 S_1 和 S_2 均无贡献, 因而信号 S_1 和 S_2 两者都与杂散光无关。

如图所示, 当线成像 700 的中心入射在中央光电探测器 142 上时, 信号 S_1 通常包含一个正峰值。此外, 由于线成像中的固有的衍射效应, 信号 S_1 包含若干旁瓣或振铃效应 (ringing)。同样, 当线成像 700 的中心入射在中央光电探测器 142 上时, 信号 S_2 通常包含一个负峰值, 和由线成像中的衍射效应产生的若干旁瓣。下面的公式 (5) 表示由信号 S_1 和 S_2 产生标记信号的一种优选方法。

$$\text{标记信号} = \begin{cases} 1, & \text{当 } S_1 > (S_2 + O) \text{ 时} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

在公式 (5) 中, O 为恒定偏移, 其最好大于 S_1 和 S_2 中的预期旁瓣峰值, 并且还最好小于预期的最小的 S_1 的最大值。

图 7 还表示根据公式 (5) 产生的标记信号。如图所示, 该标记信号具有所希望的性质, 即只要 DOE 166 产生的线成像的中心入射在中央光电探测器 142 上, 该标记信号就等于 1 或者为一个高值, 而在所有其他时刻等于零或低值。这种标记信号的特征在于, 只要 DOE 166 产生的线成像扫过标记探测器 140, 该标记信号就为一个脉冲信号。

虽然使用公式 (5) 是产生标记信号的优选方法, 不过可以想见也可以使用其他方法。例如, 当信号 S_1 大于某一选定的恒定数值时, 可以简单地将标记信号设置成一个高值。

端部光电探测器 144 的宽度最好等于中央光电探测器 142 的宽度。这就保证杂散光对信号 S_1 和 S_2 没有贡献。不过, 可以想见, 在其他实施例中, 端部光电探测器 144 的宽度可以与中央光电探测器 142 的宽度不同。使用宽度与中央光电探测器 142 不同的端部光电探测器 144 的优点在于, 这种结构通过求平均将线成像中的衍射效应消除, 因而可以减小信号 S_1 和 S_2 的旁瓣。并且, 调节探测器宽度和/或间距, 使得端部光电探测器信号中的振铃效应可以抵消来自中央光电探测器的信号中的振铃效应。如果使用这种方法, 则最好改变公式

(4) 中原始信号的权重, 使信号 S_1 和 S_2 对于杂散光依然不敏感。在其他实施方式中, 可以仅由中央探测器 142 构成标记探测器 140, 除去端部探测器 144。不过, 由于这种方法所产生的标记信号对噪声和未对准过于敏感, 因而不是优选的方法。

图 8 表示标记探测器 140 的另一实施例。在该实施例中, 探测器 140 包括两个双元 (bi-cell) 探测器 140A 和 140B。双元探测器 140A 包括中央探测器 142 和左端探测器 144。双元探测器 140B 包括中央探测器 142 和右端探测器 144。两个双元探测器最好设置成, 使得沿图 6 中所示直线 L-L 方向从光源 112 延伸的直线可平分两个双元探测器 140A 和 140B 的中央探测器 142。可以想见, 使用双元探测器 140A、140B, 根据上面的公式 (4) 易于产生信号 S_1 和 S_2 。例如, 可以简单地通过将两个中央探测器 142 产生的输出信号加在一起, 并从和中减去两个端部探测器 144 产生的输出信号就可产生信号 S_1 。

图 9 表示根据本发明构成的衍射光学编码器 100 优选实施例的端视图。图 9 表示沿图 2A 中所示直线 2D-2D 方向看去的编码器 100 的视图。图 2D 与图 9 的主要区别在于, 在图 9 中探测头 110 相对光栅 160 倾斜 (而非基本平行)。具体而言, 探测头 110 围绕一个基本平行于标尺 160 运动方向 (即平行于图 2A 中所示的直线 A-A) 的轴倾斜。编码器 100 的优选实施例包括如图 9 中所示的倾斜。如图 9 中所示使探测头 110 相对光栅 160 倾斜可带来至少两个优点。第一, 减小了从标尺 160 向回反射到光源 112 中的光量。第二, 增大并使到达探测器阵列 120 与标记探测器 140 的光量平衡。

通常, 不希望从标尺反射的光进入光源 112。首先, 即使最好的 VCSEL 光源也会受到再次进入激光介质的反射光的不利影响。第二, 由于激光的发射表面稍稍带有反射性, 到达该表面的任何光都将反射回标尺 160。这使反射和/或衍射的杂散光加倍, 如果不适当加以控制的话, 可能会在被检测信号中产生额外分量。在本发明中, 有意选择在光电子平面与标尺之间倾斜, 以使这些额外光束远离探测器。如图 9 中所示, 探测头 110 相对标尺倾斜, 可以有效地 (1) 防止标尺反射的光重新进入光源 112, 或者明显减少这种光的光量, 和 (2) 保

证由光源反射出的光不能到达探测器，或者明显减少这种光的光量。

在探测头 110 与标尺 160 之间引入倾斜的第二个作用，在于增大和平衡到达探测器的光。最好将探测头 110 倾斜，以使镜面反射光锥的峰值强度处于探测器阵列 120 与标记探测器 140 的中间位置附近。这可以使入射在两个探测器区域 120、140 上的光量最大化，同时使两个区域上的光强降落最小化。

：如上所述，将编码器 100 设计成使光源 112 与标尺 160 之间的光程长度基本上等于标尺 160 与探测器阵列 120 之间的光程长度，是有益的。这样做可以保证入射在探测器阵列 120 上的干涉条纹图案的周期与探测头 110 和标尺 160 之间的距离无关。当光源 112 为沿垂直于探测头 110 平面的方向发射光的 VCSEL 时（如图 1 中所示），可以通过使探测器阵列 120 的顶面与光源 112 的发射面共面而使光程长度相等。不过，由于光源和光电探测器均表现为具有特定厚度，实际上难以使这些表面共面。

图 10A 表示一种使这些表面共面的技术。如图 10A 中所示，在探测头 110 的基板 111 中蚀刻出沟槽 900。探测器阵列 120 的光电探测器或者光源 112 其中任何一个可以设置在沟槽 900 内，如方框 910 所示。可以想见，使用这种沟槽可以补偿探测器阵列 120 与光源 112 的厚度差。可以通过切削基板 111 或者通过使用光刻技术，形成诸如沟槽 900 的沟槽。

图 10B 表示另一种使这些表面共面的技术。如图 10B 中所示，在探测头 112 的基板 111 的上表面上设置垫片 912。如方框 910 所示，可以将探测器阵列 120 的光电探测器或者光源 112 设置在这样的垫片上。例如，可以通过材料沉积或者通过将预先形成的垫片粘帖到基板 111 的顶面上，从而形成所需厚度的垫片如垫片 112。

图 10C 和 10D 说明了如何使用边缘发射（edge emitting）激光二极管取代 VCSEL 来形成光源 112，并且说明了用于使光源 112 与标尺 160 之间的光程长度，和标尺 160 与探测器阵列 120 之间的光程长度相等的其他方法。在图 10C 中，使用以基本平行于探测头 110 上表面方向发射光的边缘发射激光二极管作为光源 112。在本实施例中，

探测头 110 还包括设置在光源 112 光路中的反射镜 920。反射镜 920 将光源 112 发射的光锥向上朝向标尺（未示出）反射。在图 10D 中，也使用边缘发射激光二极管构成光源 112。在该实施例中，光源设置在探测头 110 的基板 111 中所形成的沟槽 900 中。使沟槽 900 的一个边缘 930 具有反射性，从而边缘 930 将光源 112 发射的光锥向上朝向标尺（未示出）反射。可以想见，可以使用反射棱镜或者如美国专利 No.6,188,062 中所述的蚀刻折叠式反射镜作为反射镜 920 或反射边缘 930。图 10C 和 10D 中所示结构均影响光源 112 与标尺之间的光程长度。可以想见，可使用这种结构使光源 112 与标尺之间的光程长度，和标尺与探测器阵列 120 之间的光程长度相等。

或者，为了避免如图 10A-10D 中所提出的，使用沟槽和垫片来使光源 112 与标尺 160 之间的光程 (z_0)，和标尺 160 与探测器阵列 120 之间的光程 (z_1) 相等所带来的成本，可以放弃具有相等光程长度，并且干涉条纹周期与标尺和探测器阵列之间的距离无关的想法。在这种情形中，入射在探测器阵列 120 上的干涉条纹的周期 T ，与光栅周期 P 成正比，并由上面的公式 (3) 给出。当设计这种编码器时，需要校准标尺与探测器阵列之间的比例因子，并从而优化编码器。

在 z_0 等于 z_1 ，并且不存在其他未对准的理想情况下，编码器比例因子基本上等于 2（即，因为入射在探测器阵列上的干涉条纹周期 T 基本等于光栅周期 P 的两倍）。不过，实际上，与根据本发明构成的光学编码器有关的实际比例因子倾向于接近 2，但并非确切等于 2。比例因子通常不确切等于 2 的一个主要原因，是难以足够精确地测量部件，并且足够精密地制造出垫片/沟槽以使 z_0 严格等于 z_1 。此外，其他因素如未对准，也会干扰比例因子，使之偏离理想数值 2。最后，光学编码器的最佳比例因子为 1，其可产生最高精度性能，与干涉条纹或探测器周期的实际大小没有直接关系。

假设这种判断标准（最佳精度），现在将讨论确定根据本发明构成的光学编码器的比例因子，然后根据测得的比例因子校准编码器的优选方法。优选地，制造校准探测头和校准标尺。校准标尺具有与光栅 162 类似的校准光栅，不过其特征并非具有基本均匀的周期（如光

栅 162 优选具有均匀周期), 校准光栅包括几个不同部分, 每个部分的特征为具有唯一的周期。一个部分制成具有设计周期 P (例如 P 等于 20 微米)。其他部分的特征在于周期稍稍偏离 P 。优选地, 校准光栅的各个部分以大约 0.5% 的 P 为递增步长覆盖 P 左近的周期范围。也就是说, 各个部分的周期大约为 P , $0.995P$, $1.005P$, $0.990P$ 等。本发明者观察到, $\pm 3\%$ 的周期范围一般包括最佳周期。当然, 如本领域技术人员显然可以想到, 如果在该范围的端点处可以观察到最佳性能, 则应当制造新的具有更宽范围的校准光栅。各个校准部分可以在同一基板上空间分布, 并且间隔得足够大, 以便于识别和选择。为了易于使用和调节, 各部分的轴都应当平行。校准探测头包括校准探测器阵列, 其最好设计成(例如使用上面指出序列号为 No.60/316,121, 题为“谐波抑制光电探测器阵列 (HARMONIC SUPPRESSING PHOTODETECTOR ARRAY)” [代理人案卷号为 No.MCE-018 (111390-140)] 的美国专利申请中所述的一种方法) 用以测量入射在阵列上的干涉条纹图案的相角, 该干涉条纹图案的周期 T 基本上等于设计值 $2P$ 。然后使用校准探测头和校准标尺形成校准编码器 (例如, 如图 2A-2D 中所示)。

如果校准编码器的编码器比例因子确切等于 2 (没有其他干扰作用), 则当使用具有周期 P 的校准光栅部分的校准探测器阵列时, 校准编码器将提供最精确的结果。不过, 一般, 当校准探测器使用某些其他校准光栅部分时, 实际上将产生最为精确的结果。最好使用每个校准光栅部分来检测校准编码器, 以判断哪一个校准光栅部分可提供最精确的结果。典型地, 由编码器输出与位移精度传感器 (displacement truth sensor) 之间的均方根 (rms) 差来判断每次测量的精度, 其中位移精度传感器对光栅运动进行同步测量。激光干涉仪可以成功地用作精度传感器 (truth sensor)。

由于校准编码器设计成使用周期为 P 的光栅, 不过最为精确的结果通常由具有周期为 FP 的校准光栅部分获得, 从而可以假设在制造可供使用的编码器时, 应当使用所测得的校准因子 F 。尤其是, 可供使用的编码器应当或者使用周期为 FP 的光栅, 或者应当将探测器阵

列周期 T 变成 T/F 。

此时,通过用标尺 160 代替校准标尺,用探测头 110 代替校准探测头,根据本发明可以制造大量编码器。根据本发明用于制造编码器的一种方法,使用 (1) 具有以周期 FP 为特征的光栅 162 的标尺,和 (2) 具有探测器阵列 120 的探测头,其中该探测器阵列 120 用于测量周期 T 基本等于 $2P$ 的入射干涉条纹图案的相角。这种方法的问题,是所产生的光栅 162 周期 FP 不可能为标准长度单位(即微米或毫米)的整数倍。因此,例如,这种光栅的光栅周期可以为 20.2 微米,而非典型的 20 微米。从而,根据本发明用于构成编码器的最佳方法,是使用 (1) 周期为 P 的光栅 162,和 (2) 具有探测器阵列 120 的探测头,其中该探测器阵列 120 用于测量周期基本上等于 $2P$ 除以比例因子 F 的入射干涉条纹图案的相角。优选后一种方法,因为其允许根据本发明构成的任何一种探测头可与工业标准标尺一起互换使用。

如果编码器中包含标记探测器 140,可以想见,还希望根据校准比例因子调节标记探测器元件的宽度。例如,使标记探测器 140 的中央光电探测器的宽度基本等于光栅 162 的周期 P 除以比例因子 F ,这样更为有利的。

图 11A 和 11B 表示根据本发明构成的编码器可包含的其他特征。图 11A 和 11B 均表示从与图 2A 的相同的视角看去的衍射光学编码器 100 的侧视图。图 11A 表示从探测头 110 向上朝向标尺 160 延伸的发散光锥 102。图 11A 还表示被标尺 160 的光栅 162 向下朝向探测器阵列 120 衍射的三个光束。具体而言,图 11A 表示 0 级光束,用附图标记 1000 表示其左边界和右边界;负 1 级光束,用附图标记 1001 表示其左边界和右边界;以及负 3 级光束,用附图标记 1003 表示其左边界和右边界。如图所示,0 级、负 1 级和负 3 级光束均入射在探测器阵列 120 上。可知其他光束(例如正 1 和 3 级,以及正和负 5 级光束)也入射在探测器阵列 120 上,不过为了便于说明,在图 10A 中没有表示出这些光束。图 11A 中所示编码器的的问题在于,大量衍射光束都入射在探测器阵列 120 上,并且这些光束的存在会降低所产生的入射在探测器阵列 120 上的干涉条纹图案的质量。

图 11B 中所示的编码器 100 与图 11A 中所示相似, 不过, 图 11B 的编码器还包括掩模 1010。如图所示, 掩模 1010 靠近标尺 160 设置, 处于探测头 110 与标尺 160 之间。掩模 1010 还限定了中央小孔 1012。掩模 1010 防止光锥 102 中的大多数光到达标尺 160。即, 仅有穿过小孔 1012 的光到达标尺 160。最好由吸收材料制造掩模 1010, 使入射在掩模 1010 上的光被简单地吸收, 不向回朝向探测头 110 反射。掩模 1010 有利于限制被标尺 160 向回朝向探测头 110 衍射的光束的角度范围。在图 11B 所示的编码器中, 0 级和负 1 级光束入射在探测器阵列 120 上, 不过负 3 级光束没有入射到探测器阵列 120 上。可知如果 3 级光束没有入射到探测器阵列 120 上, 则所有更高级光束也将没有入射在探测器阵列上 (即与所示的负 3 级光束相比, 更高阶光束将处于探测器阵列 120 的更左或更右处)。从而通过去除不希望的更高级光束, 掩模 1010 有利于提高入射在探测器阵列 120 上的干涉条纹图案的质量。在使用时, 掩模 1010 和探测头 110 最好彼此保持相对固定, 而标尺 160 相对探测头 110 移动 (在图 11B 所示结构中向左和向右)。

如上述序列号为 No.60/316,121, 题为“谐波抑制光电探测器阵列 (HARMONIC SUPPRESSING PHOTODETECTOR ARRAY)” [代理人案卷号 No.MCE-018 (111390-140)] 的美国专利申请中所述, 优选的探测器阵列对于第 3 级谐波不灵敏。并且, 使用占空系数为 50-50 的光栅, 防止所有偶数级光束到达探测器阵列 120。因此, 小孔 1012 不必很小以保证第 3 或第 4 级光束不到达探测器阵列。最好, 小孔 1012 为矩形, 并且小孔的宽度小到刚好足以防止第 5 级衍射光束到达探测器阵列 120。最好选择小孔 1012 的高度, 使光锥 102 的光能够同时照射光栅 162 和 DOE 166。

在根据本发明构成的编码器的一个优选实施例中, 探测头 110 与标尺 160 之间的距离 d 基本等于 4.7mm, 并使用 VCSEL 作为光源 112, 其光锥角等于大约 17 度, VCSEL 发射的光波长基本等于 850nm, 探测头 110 与标尺 160 之间的倾斜角基本上等于 8 度, 光栅 162 的周期 P 基本上等于 20 微米, 并且探测器阵列 120 用于监测周期基本等于

40 微米的入射干涉条纹图案。在另一优选实施例中，限定矩形小孔 1012 的掩模 1010 的特征为，宽度基本上等于 0.4 毫米，高度基本上等于 1.2 毫米，该掩模 1010 设置在探测器头 110 与标尺 160 之间，并且掩模 1010 与标尺 160 分隔的距离基本上等于 250 微米。

已经披露了几种用于构造改进的衍射光学编码器的方法。可以想见，根据本发明通过采用一种或多种这些方法可以构造编码器。例如，根据本发明可以构造包括标记探测器而不包括掩模的编码器（例如如图 11A 和 11B 中所示）。同样，根据本发明可以构造包括掩模而不包括标记探测器的编码器。此外，根据本发明还可以构造同时包括掩模和标记探测器的编码器。

由于在不脱离此处所包含的本发明范围的条件下可以对上述装置进行某些变型，意味着上面描述中所包含的或者附图中所示的所有内容将理解为说明性而非限制性的。

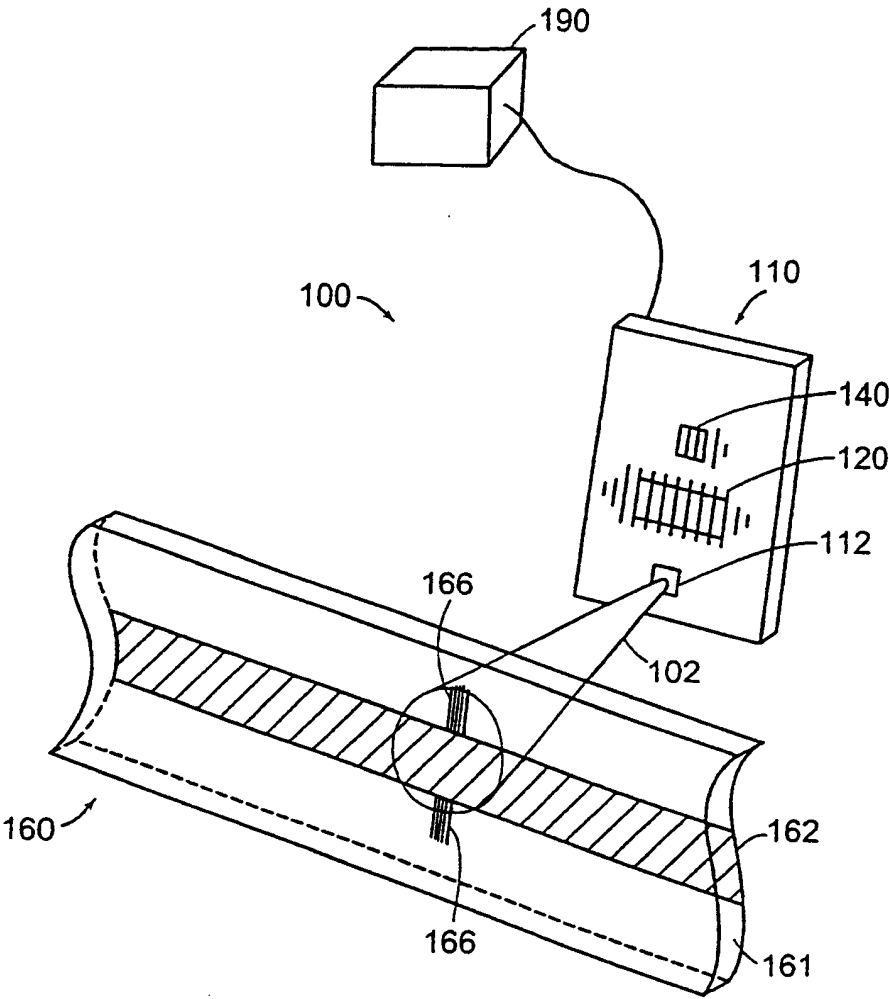


图1

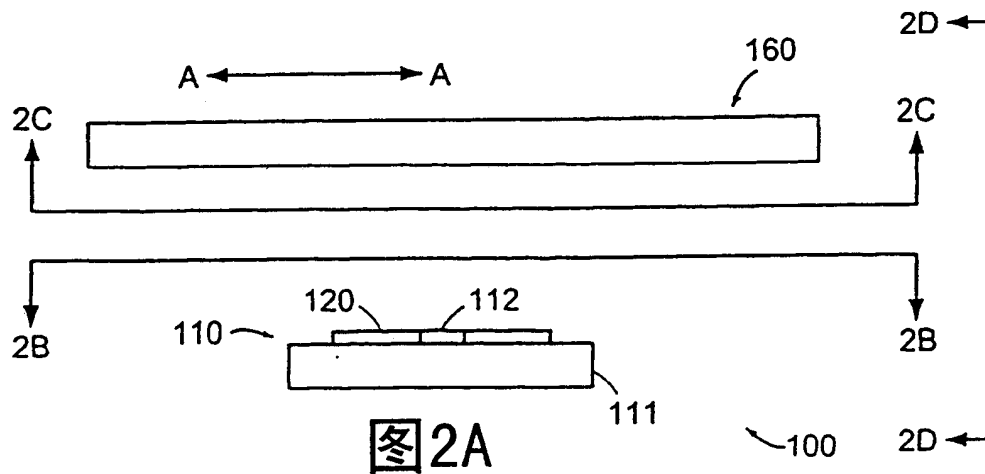


图2A

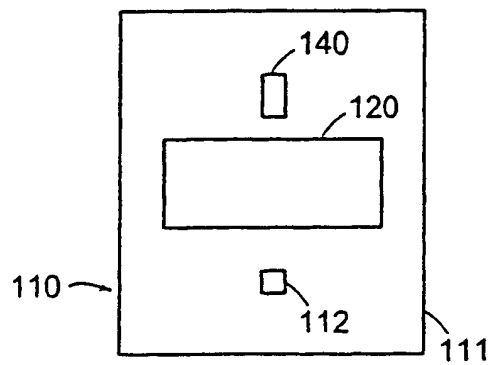


图2B

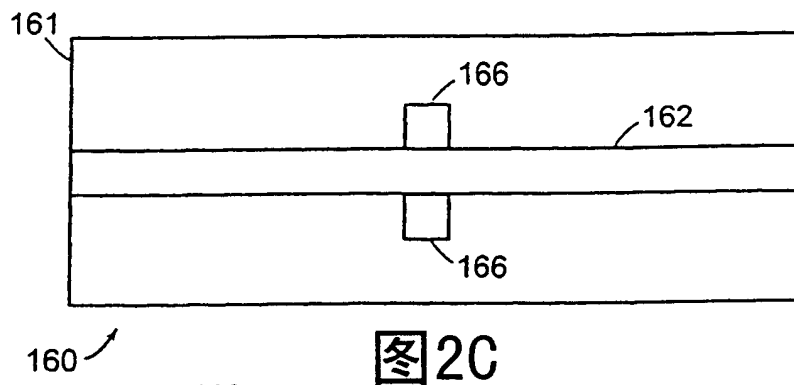


图2C

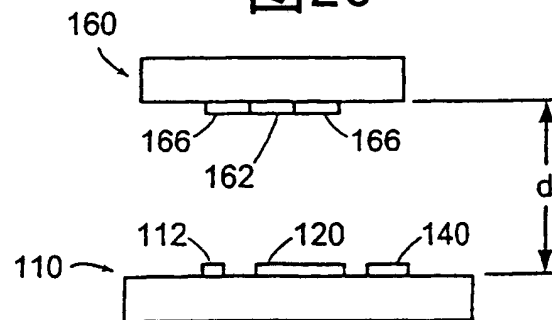


图2D

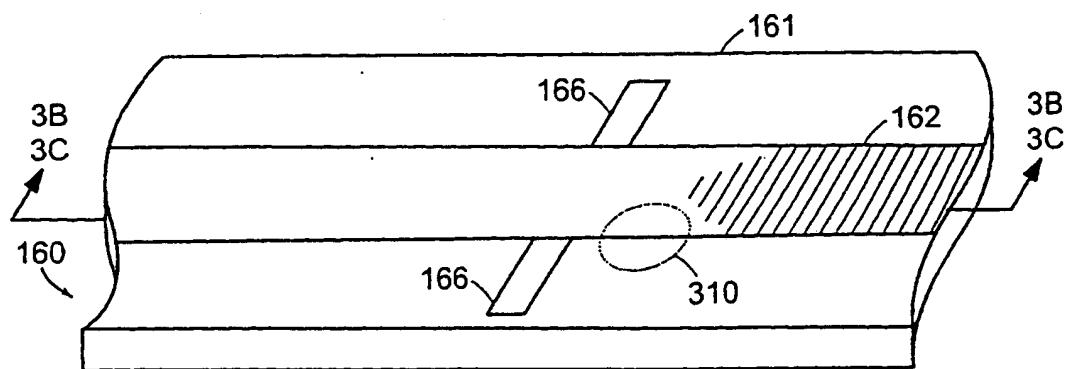


图3A

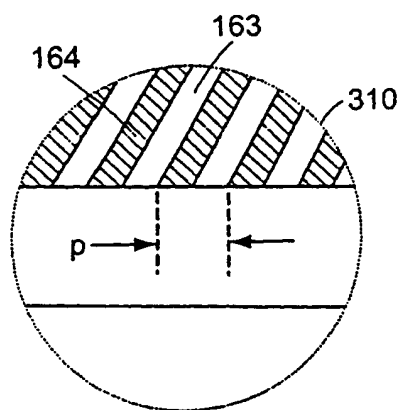


图3B

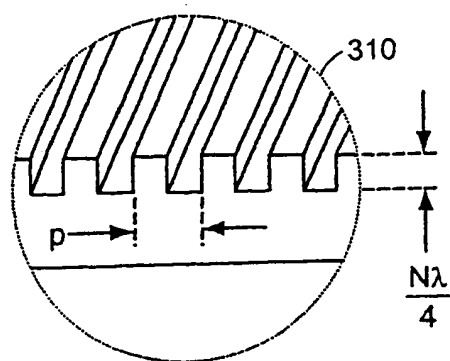


图3C

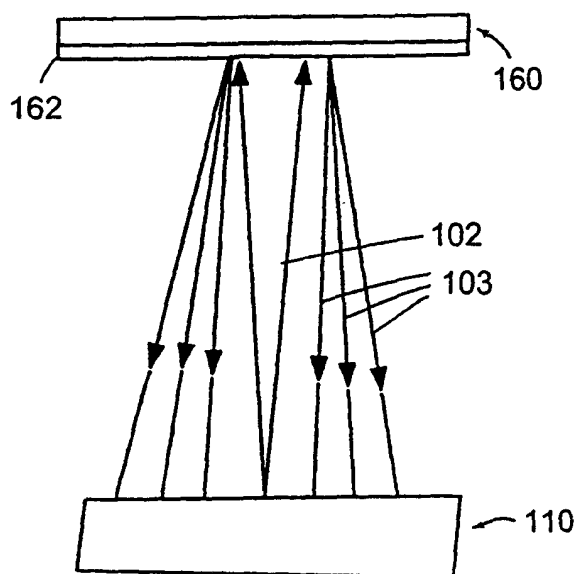


图4

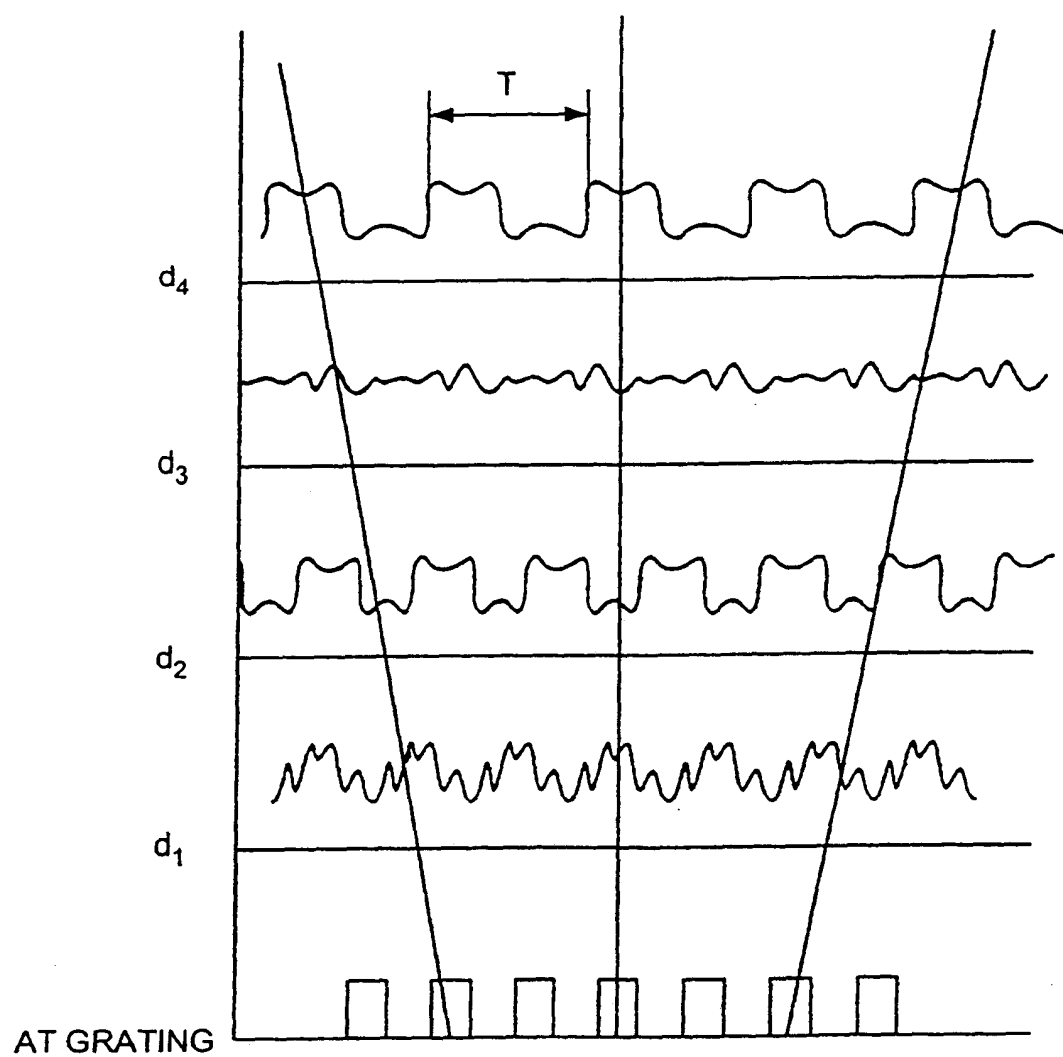


图5

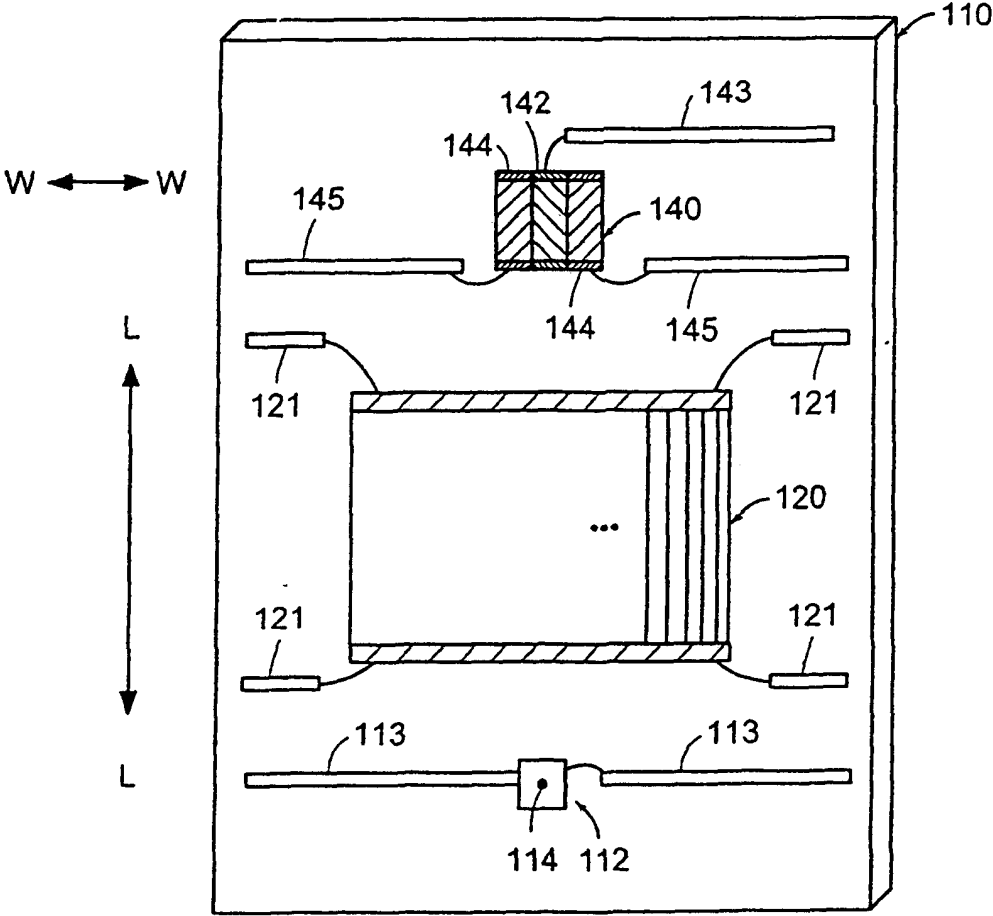


图6

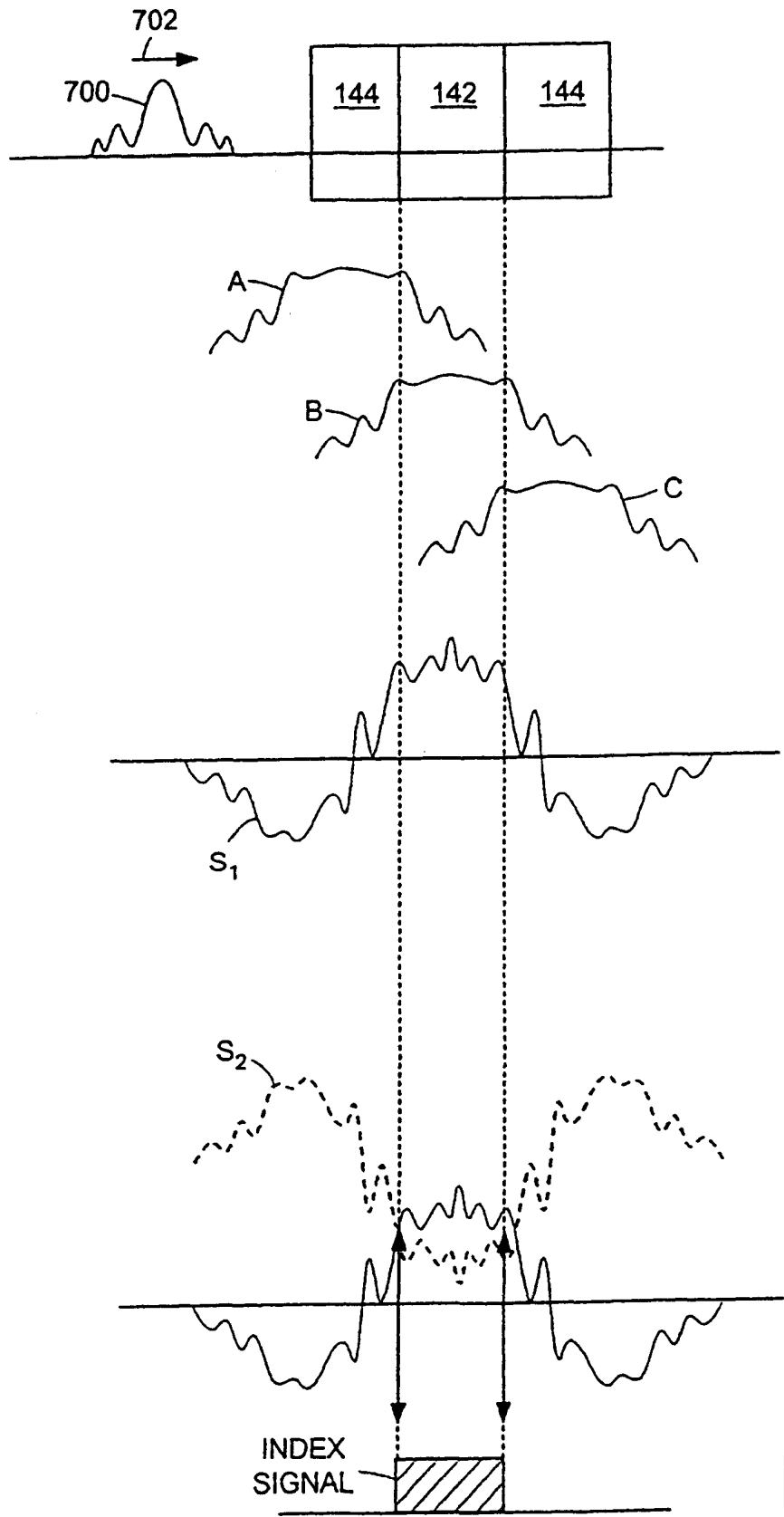


图7

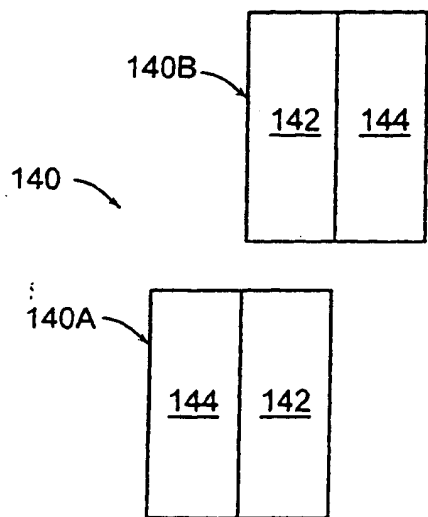


图8

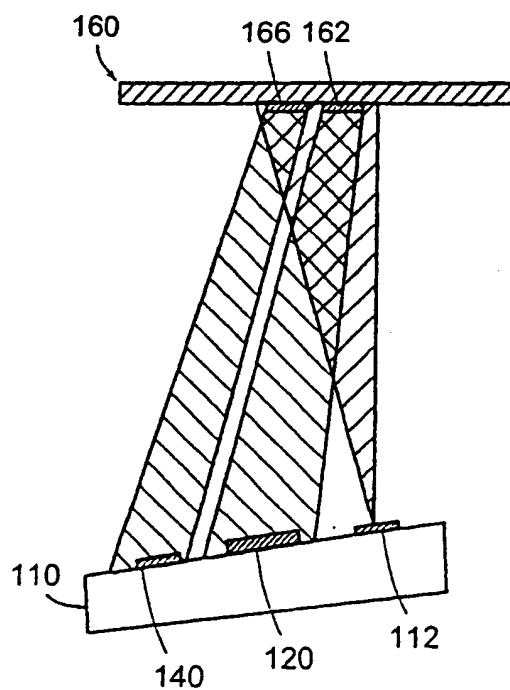


图9

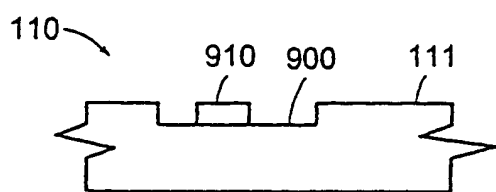


图10A

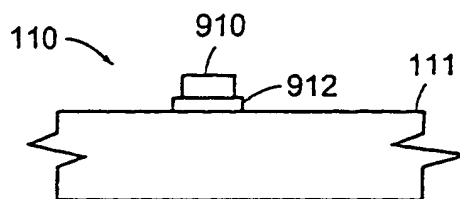


图10B

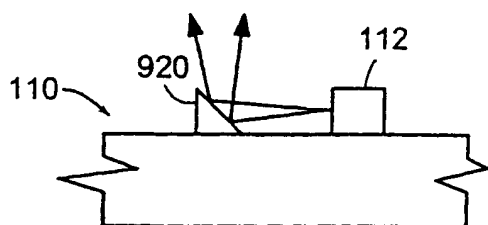


图10C

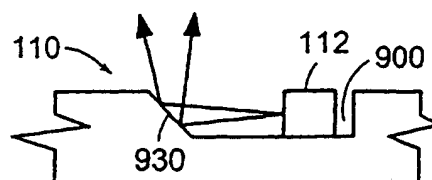


图10D

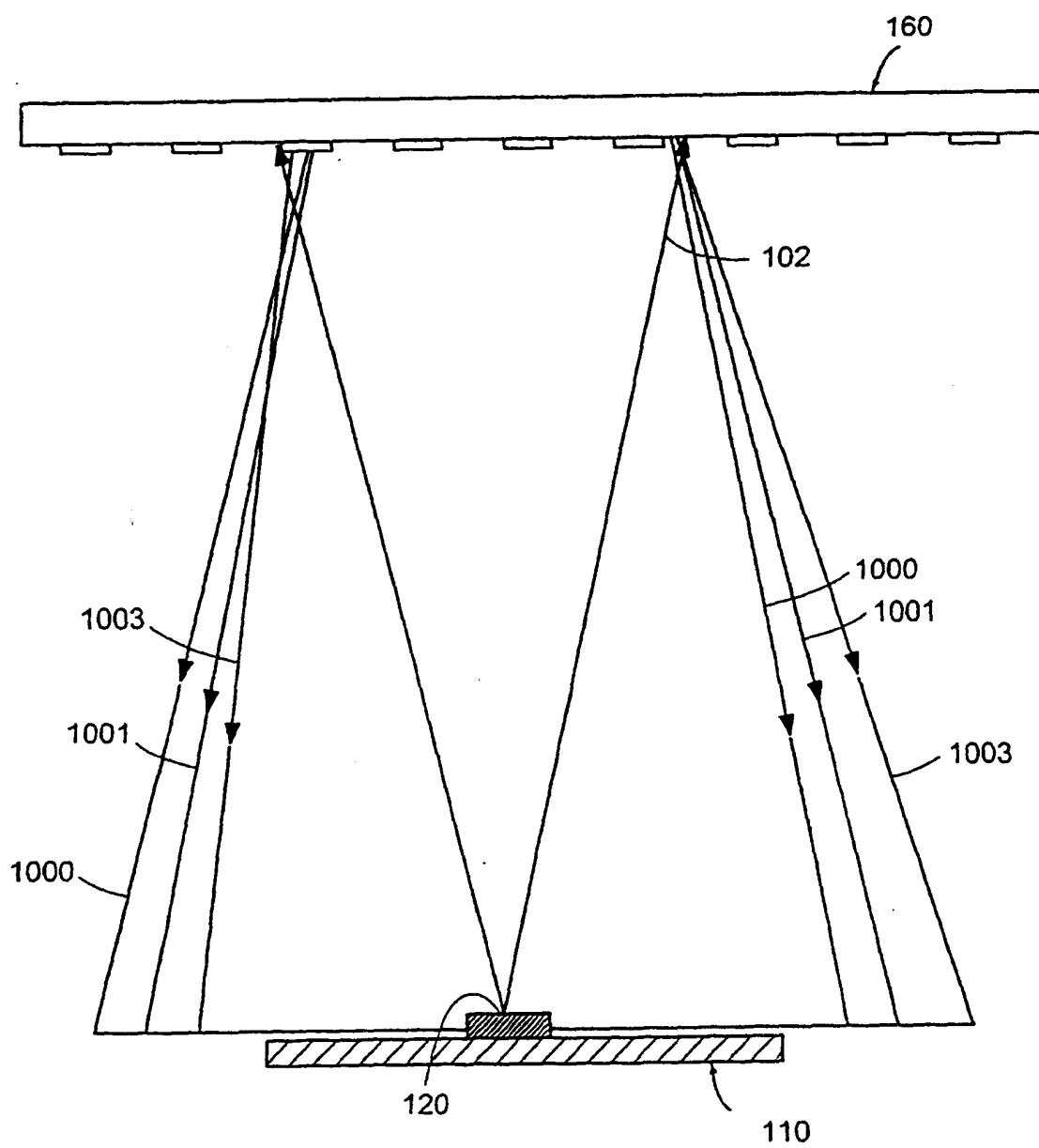


图11A

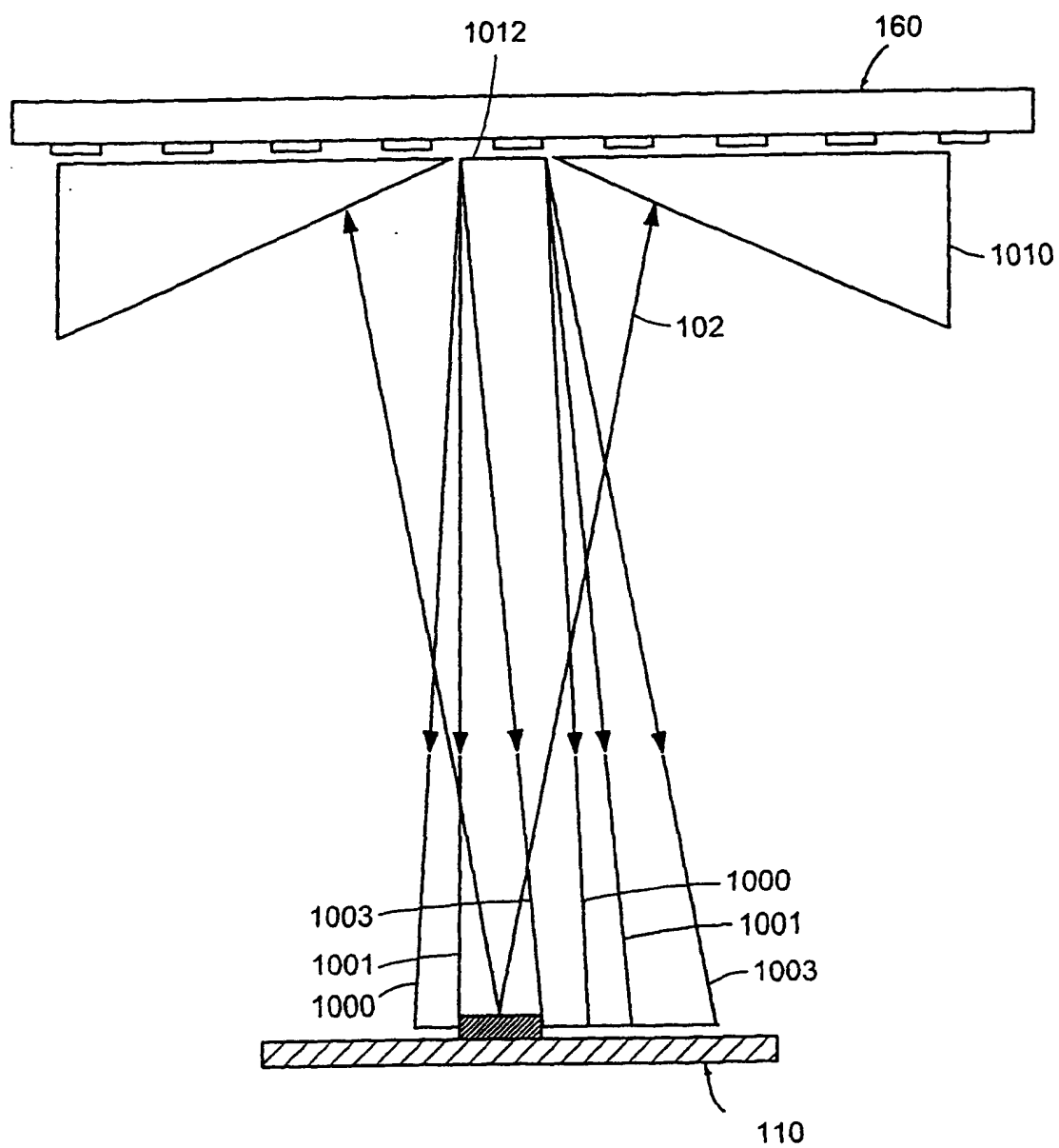


图11B