



[12] 发明专利申请公开说明书

[21]申请号 94190054.1

[51]Int.Cl⁵

G01D 5/48

[43]公开日 1995年5月3日

[22]申请日 94.1.10

[30]优先权

[32]93.1.13 [33]GB[31]9300556.9

[32]PCT/GB94[33]00[31]39 94.1.10

[32]WO94/162[33]4 [31]英 94.7.21

[32]94.10.10[33][31]

[71]申请人 大不列颠及北爱尔兰联合王国国防大臣

地址 英国英格兰伦敦

[72]发明人 M·F·路易斯

[74]专利代理机构 中国专利代理(香港)有限公司

代理人 杜有文 E 岳

G01B 9/02 G01J 9/04

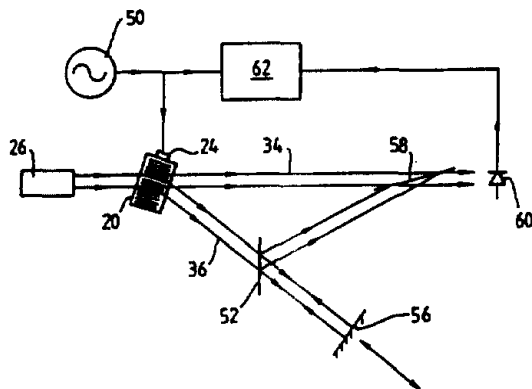
说明书页数:

附图页数:

[54]发明名称 纳米度量计

[57]摘要

用于以纳米精度测量物体的位移的设备,它包括:用于初级电信号的rf源(50);传感器(24),用于产生中间信号;相移装置(56),它与中间信号作用,以使物体的位移使相移装置(56)将中间信号的路径长度改变一个与该位移直接有关的量;相位传递装置(60),使中间信号的相位被传递到次级信号;以及,相位检测器(62),用于测量次级信号的相位在物体位移时相对于初级信号的改变。



1. 用于测量物体的位移的设备, 包括:

一个射频(rf)源, 用于产生一个初级稳定 rf 电信号,

一个传感装置, 用于至少利用一部分初级 rf 电信号来产生一个中间信号, 所述中间信号的波长小于初级 rf 电信号的波长,

一个相移装置, 它在该设备使用时与中间信号进行作用并以这样的方式与物体相联系, 即物体的位移使相移装置将中间信号的路径长度改变了一个与该位移直接有关的量,

一个相位传递装置, 用于至少部分地利用与相移装置发生作用之后的中间信号来以这样的方式产生一个次级稳定 rf 电信号, 即使得经过作用的该中间信号的相位被传递到该次级 rf 电信号, 以及

一个相位检测器, 用于测量次级 rf 电信号的相位在物体位移时相对于初级 rf 电信号的改变。

2. 根据权利要求 1 的设备, 其中中间信号是一个光信号。

3. 根据权利要求 2 的设备, 其中传感装置包括一个用于产生光信号的光信号源和一个用于将该光信号与初级 rf 电信号进行混频以产生一个得到频移的第一光信号和一个未得到频移的第二光信号的混频装置, 第一和第二光信号中的一个可以为该中间信号。

4. 根据权利要求 3 的设备, 其中混频装置是一个声—光传感器, 在该声—光传感器中由一个受到初级 rf 电信号驱动的声传感器产生体射频声波, 且光信号被引入到该声—光传感器中以产生一个

得到偏转的第一光信号和一个未得到偏转的第二光信号。

5. 根据权利要求 2 至 4 中的任何一项的设备, 其中相移装置是一个镜, 中间信号被引向该镜且该镜被刚性地固定在物体上。

6. 根据权利要求 3 至 5 中的任何一项的设备, 其中相位传递装置包括一个用于对第一和第二光信号进行混频以产生一个差频信号的装置, 该差频信号是次级 rf 电信号。

7. 根据权利要求 6 的设备, 其中相位传递装置包括一个光电二极管和一个用于将第一和第二光信号以这样的方式引向该光电二极管上的装置, 即使所述信号以平行的波前和相同的极性重叠。

8. 根据权利要求 1 的设备, 其中中间信号是一个 rf 声波。

9. 根据权利要求 8 的设备, 其中传感装置包括一个声波介质和一个由初级 rf 电信号驱动以在该声波介质中产生 rf 声波(它是中间信号)的声传感器, 且相移装置在设备使用时与该声波进行作用并以这样的方式与物体有关, 即使得物体的位移改变通过声传感器和一个声波探头之间的声波介质的声波的路径长度, 该声波探头形成了相位传递装置的至少一部分。

10. 根据权利要求 9 的设备, 其中相移装置包括被刚性地固定在物体上的声传感器和介质, 且声波探头得到了固定, 以使物体的位移使声传感器和介质相对于声波探头移动一个与该位移直接有关的量。

11. 根据权利要求 9 或 10 的设备, 其中中间信号是一个 rf 体声波。

12. 根据权利要求 11 的设备, 其中声波介质是一个声—光传感器且声传感器得到设置以在该声—光传感器中产生一个 rf 体声波

(它是中间信号), 且相位传递装置包括一个光信号源, 该光信号源产生一个光信号 (它构成了声波探头), 该光信号被引入声-光传感器中并与体声波发生作用以产生一个得到频移的第一光信号和一个未得到频移的第二光信号, 该相位传递装置进一步包括一个用于对该第一和第二光信号进行混频以产生一个差频信号的装置, 该差频信号就是次级 rf 电信号。

13. 根据权利要求 12 的设备, 其中用于对第一和第二光信号进行混频以产生一个差频信号的装置包括一个光电二极管和用于将第一和第二光信号引向光电二极管以使所述信号以平行的波前和相同的极性重叠的装置。

14. 根据权利要求 9 或 10 的设备, 其中中间信号是一个射频表面声波。

15. 根据权利要求 14 的设备, 其中声波介质是一个表面声波基底, 且声传感器得到设置以在该基底上产生一个表面声波 (它是中间信号), 且相位传递装置是一个表面声波探头。

16. 根据前面任何一个权利要求的设备, 其中用于产生初级 rf 电信号的 rf 源是能够进行频率调谐的, 以在物体位移时使初级 rf 电信号的频率能够得到调谐以恢复在位移之前的初级和次级 rf 电信号之间的相对相位。

17. 如以上结合说明与图 1 至 3 中的任何一个进行具体描述的设备。

18. 用于测量物体的位移的方法, 包括:

产生一个初级稳定射频 (rf) 电信号,

至少部分地利用该初级信号产生一个中间信号, 所述中间信号

的波长小于初级 rf 电信号的波长,

使该中间信号与同物体有关的一个相移装置以这样的方式发生作用, 即使得该物体的位移造成该相移装置把中间信号的路径长度改变一个与该位移直接有关的量,

使该物体产生一个位移,

至少部分地利用与相移装置发生作用之后的中间信号而以这样的方式产生一个次级稳定 rf 电信号, 即使得该中间信号的相位被传递到该次级 rf 电信号, 以及

测量在物体位移时该次级 rf 电信号的相位相对于初级 rf 电信号的改变。

19. 根据权利要求 18 的方法, 其中中间信号是一个光信号。

20. 根据权利要求 19 的方法, 其中中间信号的产生包括产生一个光信号并将该光信号与初级 rf 电信号混频以产生一个得到频移的第一光信号和一个未得到频移的第二光信号, 这两个信号中的一个可以是中间信号。

21. 根据权利要求 20 的方法, 其中光信号与初级 rf 电信号的混频包括在声—光传感器中利用一个由初级 rf 电信号驱动的声传感器产生体射频声波并将光信号引入到声—光传感器中以产生一个偏转的第一光信号和一个未偏转的第二光信号。

22. 根据权利要求 20 或 21 的方法, 其中次级 rf 电信号的产生包括将第一和第二光信号混频以产生一个差频信号, 该差频信号是次级 rf 电信号。

23. 根据权利要求 22 的方法, 其中次级 rf 电信号的产生包括将第一和第二光信号引向光电二极管以使所述光信号以平行的波前和

相同的极性相重叠。

24. 根据权利要求 18 的方法, 其中中间信号是射频声波信号。

25. 根据权利要求 24 的方法, 其中中间信号的产生包括利用由初级 rf 电信号驱动的一个声传感器来产生一个声波信号 (中间信号), 且次级 rf 电信号的产生包括使该声波信号与一个声波探头发生作用。

26. 根据权利要求 25 的方法, 其中物体的位移使声传感器相对于声波探头移动一个与该位移直接有关的量。

27. 根据权利要求 24 至 26 中的任何一项的方法, 其中中间信号是一个射频体声波。

28. 根据权利要求 24 至 26 中的任何一项的方法, 其中中间信号是一个射频表面声波。

29. 根据权利要求 18 至 28 中的任何一项的方法, 其中对次级 rf 电信号的相位改变的测量包括在物体位移时对初级 rf 电信号进行频率调谐以恢复初级和次级 rf 电信号在位移之前的相对相位。

30. 如以上结合说明和图 1 至 3 中的任何一个所描述的方法。

纳米度量计

本发明涉及用于测量物体的位移至纳米精度的设备和方法，特别是用于制造现代化信号处理元件的设备和方法。

在很多现代化信号处理元件的制造中，需要以高至微米的精度来制造复杂的图案。这些元件包括半导体集成电路、表面声波 (SAW) 器件、磁和光存储器以及诸如 DFB 激光器、集成光学器件和空间光调制器的许多光学元件。因此，在几平方厘米量级的面积中以微米的精度产生并测量用于制造这种元件的设备的位移的能力，是必要的。在这些技术中，有一种尽可能地使元件小型化的趋势，因为例如这样不仅能够在单位面积上获得更多的晶体管，而且更小的晶体管的运算速度更快。类似地，小的特征扩展了激光器和 SAW 元件的频率范围和保真度。因此要求在几平方厘米量级的面积内以纳米精度测量位移。

在过去，这种信号处理元件经常是利用掩膜制作设备并随后进行摄影还原而制成的，该掩膜制作设备采用了大型的高精度机械平移平台。更近一些，采用了激光干涉仪，其中从装在一个平移平台上的镜反射的激光束与一个基准激光束相干涉以产生一个条纹图案。对于平移平台等于激光的波长的一半的位移，该条纹图案将移动一个周期。高至条纹的一半的精度的条纹图案移动是容易测量的，所以对于 500nm 的典型激光波长，能够获得 125nm 的精度。这种精度能

够借助条纹之间的内插而被改善到最终由信号噪声比确定的程度。激光干涉仪使得能够例如通过采用电子束平版印刷技术而将元件或用于元件的掩膜上的结构以最后的大小直接写入。

本发明的一个目的,是提供一种设备,它能够在至少几平方厘米的区域中以高至纳米的精度测量一个物体的位移。本发明进一步的目的,是提供一种方法,它能够以高至纳米的精度,在至少几平方厘米的区域上测量一个物体的位移。

根据本发明的第一个方面,提供了用于测量一个物体的位移的设备,它包括:

一个射频(rf)源,用于产生一个初级稳定 rf 电信号,

一个传感装置,用于至少部分地利用该初级 rf 电信号产生一个中间信号,所述中间信号具有小于初级 rf 电信号的波长的波长,

一个相移装置,它在该设备的使用中与该中间信号进行相互作用并以这样的方式与物体发生联系,即使得物体的位移造成该相移装置把该中间信号的路径长度改变与该位移直接相关的量,

一个相位传递装置,用于至少部分地利用与相移装置发生作用之后的中间信号来以这样的方式产生一个次级稳定 rf 电信号,即使得该经过作用的中间信号的相位被传递到该次级 rf 电信号,以及

一个相位检测器,用于测量次级 rf 电信号的相位在物体位移时相对于初级 rf 电信号的改变。

当使一个物体产生一个位移 d 时,在中间信号与相位传递装置进行作用之前,其路径长度改变了一个与该位移直接有关的量。路径长度的这个改变 d' ,使中间信号在与相位传递装置作用时的相位改变了等于 $360 \times d' / l$ 度的相移 p ,其中 l 是该中间信号的波长。该中

间信号的波长小于从其中导出的 rf 电信号的波长, 该中间信号通常是一个声或光信号, 其相位难于以高精度进行测量。然而, 两个射频电信号之间的相对相位能够以高至一度以内的精度被测量出来。本设备将来自中间信号的相移 p 传递到一个 rf 电信号, 从而在物体发生位移时能够通过测量初级和次级 rf 电信号之间的相位改变, 来以一度以内的精度对 p 的值进行测量。如果能够以例如五分之一度的精度测量该相移 p , 则根据本发明的设备就能够以 l 的 $1/1800$ 的精度对位移 d 进行测量。因此, l 越小, 对位移 d 的测量就越精确。

例如, 如果该中间信号是一个声波信号, 诸如波长一般在 3000nm 至 8000nm 之间的体或表面声波, 则能够以高至 $3000 \times 1/1800\text{nm}$ 和 $8000 \times 1/1800\text{nm}$ 之间的一即 4.4nm 和 1.6nm 之间的精度(假定 $d = d'$ 且相移 p 能够以高至一度的五分之一度的精度进行测量), 对物体的位移 d 进行测量。如果该中间信号是一个光信号且其波长一般在几百 nm , 则能够以高至小于 1nm 的精度对物体的位移进行测量。借助诸如电子束平版印刷技术, 本发明使得一个元件或用于元件的掩膜上的结构能以最后的大小直接被写入到几平方厘米的区域上。

该中间信号最好是光信号, 因为这使得所测位移的精度小于 1nm 。另外, 来自电—光技术的标准技术也可被用于该设备。

当该中间信号是光信号时, 传感装置最好包括一个用于产生光信号的光信号源和一个混频装置, 该混频装置用于把光信号与初级 rf 电信号相混合以产生一个得到频移的第一光信号和未被频移的第二光信号, 这两个信号中的任何一个都可以是中间信号。被选为中间信号的光信号随后得到相移, 且另一个光信号被用在作为中间信号

的本机振荡器的相位传递装置中以产生次级 rf 电信号。

在原理上, 该混频装置可具有多种形式, 例如 rf 驱动集成光相位或幅度调制器或集成光单边带混频器。然而, 当采用这些器件时, 很难分离频移和未频移的光信号。更好的是该混频装置为一个声—光传感器 (acousto-optic cell), 其中体射频声波 (bulk radio frequency acoustic wave) 由一个被初级 rf 电信号驱动的声传感器引起且光信号被引入其中以产生一个偏转的第一光信号和一个未偏转的第二光信号。采用一个声—光传感器 (acousto-optic cell) 作为混频装置是方便的, 因为在这种器件中第一和第二信号在空间上被自动分离了。

当该中间信号是光信号时, 该相移装置最好是一个镜, 中间信号被引到该镜上, 且该镜被刚性地固定在该物体上。如果借助利用一个镜的反射而使中间光信号的路径长度发生改变, 则镜的位移 d 造成中间信号的路径长度的改变 $2d$, 且因而设备的精度可被加倍。

该相位传递装置最好包括一个用于对第一和第二光信号进行混频以产生一个差频信号的装置, 该差频信号是该次级 rf 电信号并在混频时携带着中间信号的相位。更好地是它包括一个光电二极管和一个用于使第一光信号和第二光信号射到该光电二极管上以使所述信号以平行的波前和相同的极性相重叠的装置。由于只有一个光信号经历了频移且只有一个光信号经历了相移, 所以光电二极管产生的差频信号与初级 rf 电信号处于相同的频率并携带着中间信号的相位。

或者, 该中间信号可以是一个 rf 声波, 诸如一个体声波 (bulk acoustic wave) 或表面声波 (surface wave)。当中间信号是 rf 声波时,

传感装置包括一个声波介质和一个由初级 rf 电信号驱动以在声波介质中产生 rf 声波 (它是中间信号) 的声传感器, 且该相移装置在设备的使用中与声波进行作用并与物体发生联系, 以使物体的位移改变通过在声传感器和一个声波探头之间的声波介质的声波的路径长度, 该声波探头形成了相位传递装置的至少一部分。在声传感器和声波探头之间的声波的路径长度, 能够通过设置物体的位移以移动声传感器和介质或声波探头, 而得到改变。该相移装置最好包括被刚性地固定到物体上的声传感器和介质, 且该声波探头得到固定, 以使物体的位移使声传感器和介质相对于声波探头移动一个与该位移直接有关的量。

当中间信号是体声波 (bulk acoustic wave) 时, 声波介质是一个声—光传感器且声传感器得到设置以在该声—光传感器中引起 rf 体声波 (中间信号), 且相位传递装置包括一个产生一个光信号 (它形成了声波探头) 的光信号源, 该光信号被射到该声—光传感器中并与该体声波发生作用以产生一个得到频移的第一光信号和一个未得到频移的第二光信号, 该相位传递装置进一步包括一个用于对第一和第二光信号进行混频以产生一个差频信号的装置, 且该差频信号就是次级 rf 电信号。用于对第一和第二光信号进行混频以产生一个差频信号的该装置, 可以是一个光电二极管和一个用于将第一和第二光信号引导到该光电二极管上以使所述信号以平行的波前和相同的极性重叠的装置。

第一光信号, 在来自光信号源的光信号与在声—光传感器中的体声波发生作用的位置上, 将携带体声波的相位。体声波的相位随着来自声传感器的波的距离连续地变化。因此, 如果声传感器和电—光

传感器相对于物体而刚性地固定时，物体的任何位移将改变光信号和声波之间的作用的位置，并因此而使第一光信号携带的相位改变一个与该位移直接有关的量。

对于大约 1GHz 的一般的 rf 频率，体声波一般具有 3 至 8 微米的波长，所以 1° 的相移对应于 8 与 22nm 之间的位移。因此，以这种方式利用体声波可以得到的空间分辨率，与利用激光干涉仪所能够得到的相似。然而，该设备可以具有一些实际的优点，诸如减少了尺寸和所包含的部件的成本、操作的方便和高于激光干涉仪的测量速度。

当体声波引入相移时，该声—光传感器最好包括一种高速声波材料。高速晶体倾向于具有低的声波衰减，并因而允许以厘米测量的行进，而如果在其上进行测量的面积是几平方厘米的量级或更高，这就是必需的。这是由于声—光传感器自身被装在该物体上，所以声波路径必须在进行测量的区域的长度上延伸。

或者，该中间信号可以是一个射频表面声波和声波介质是一个表面声波基底，声传感器得到适当设置以在基底中产生一个表面声波(它是中间信号)，且相位传递装置是一个表面声波探头。采用表面声波的该设备，能够实现与采用体声波的设备类似的精度。然而，体声波是较佳的，因为它们比较不容易受到诸如空气涡流的周围干扰的影响。

用于产生初级 rf 电信号的 rf 源最好是频率可调谐的，以便在物体位移时初级 rf 电信号的频率能够得到调谐，以恢复由相位检测器测量的、在位移之前的初级和次级 rf 电信号之间的相对相位。以此方式，精密的测量能够从对相位的测量改变成对频率的测量，且可以

以比射频相位更高的精度测量无线电频率。

根据本发明的第二个方面，提供了一种用于测量一个物体的非常小的位移的方法，它包括：

产生一个初级稳定射频(rf)电信号，

至少部分地利用该初级信号产生一个中间信号，所述中间信号的波长小于初级 rf 电信号的波长，

使该中间信号与同物体有关的一个相移装置以这样的方式发生作用，即使得该物体的位移造成该相移装置把中间信号的路径长度改变一个与该位移直接有关的量，

使该物体产生一个位移，

利用与相移装置发生作用之后的中间信号的至少一部分而以这样的方式产生一个次级稳定 rf 电信号，即使得该中间信号的相位被传递到该次级 rf 信号，以及

测量在物体位移时该次级 rf 电信号的相位相对于初级 rf 电信号的改变。

中间信号最好是一个光信号。当中间信号是一个光信号时，中间信号的产生最好包括产生一个光信号并使该光信号与初级 rf 电信号相混频以产生一个被频移的第一光信号和一个未被频移的第二光信号，这两个信号中的任何一个都可以是中间信号。更好地，光信号与初级 rf 电信号的混频包括利用一个由该初级 rf 电信号驱动的声传感器而在一个声—光传感器中产生体射频声波，并把该光信号引到该声—光传感器中以产生一个偏转的第一光信号和一个未偏转的第二光信号。

次级 rf 电信号的产生最好包括将第一和第二光信号进行混频

以产生一个差频信号,该差频信号是次级 rf 电信号。更好地,它包括将该第一和第二光信号以这样的方式引到一个光电二极管上,即使得所述信号以平行的波前和相同的极性而得到重叠。

或者,该中间信号可以是一个诸如体声波或表面声波的射频声波。当中间信号是一个声波时,则中间信号的产生包括利用一个由初级 rf 电信号驱动的声传感器在一个声波介质中产生一个声波信号(该信号是中间信号),且次级 rf 电信号的产生包括使该声波信号与一个形成相位传递装置的至少一部分的声波探头进行作用。物体的位移最好使声传感器和介质相对于声探头移动一个与该位移直接有关的量,从而使声传感器和声波探头之间的声波的路径长度改变相同的距离。

对次级 rf 电信号的相位的改变的测量,可包括在物体位移时对初级 rf 电信号进行频率调谐,以恢复初级和次级 rf 电信号之间在该位移之前的相对相位。

根据本发明的第二个方面的该方法,其优点有与上面结合第一个方面的设备讨论的优点相同。

现在借助以下附图,以仅仅是举例的方式,描述根据本发明的设备和方法。在附图中:

图 1 显示了根据本发明的设备的第一实施例,其中中间信号是一个表面声波。

图 2 显示了根据本发明的设备的第二实施例,其中中间信号是一个体声波且该设备包含一个安装在一个平移平台上的声—光布拉格传感器(acoustic-optic Bragg cell)。

图 3a 显示了根据本发明的设备的第三实施例,其中中间信号是

一个光信号且该设备包含安装在一个平移平台上的一个镜和一个固定的声—光布拉格传感器。

图 3b 显示了图 3a 的设备的一个替换修正形式。

首先参见图 1, 其中中间信号是一个表面声波 (SAW)。一个压电 SAW 基底 4, 诸如石英或 LiNbO_3 , 被安装在一个精密的平移平台 2 上, 后者由一个步进马达系统操作, 而该步进马达系统能够沿着箭头 18 所示的方向以小的递增步移动。在 SAW 基底 4 上由 SAW 叉指式传感器 6 产生表面声波, 初级射频波从一个稳定 rf 源 8 经过一个柔性电缆 10 而被提供给传感器 6。一个 SAW 吸收器 12 位于 SAW 基底 4 与传感器 6 相对的一端, 以吸收表面声波, 以使它们不会在基底 4 上被反射回来。在与传感器 6 邻近的 SAW 基底 4 的端部还有一个 SAW 吸收器 (未显示)。一个固定 SAW 探头 14 抽取出表面声波的一部分并将其转换成一个次级 rf 电信号。该次级 rf 电信号和来自 rf 源 8 的初级信号被送到一个得到设定以测量两个 rf 电信号的相对相位的相位检测器 16, 例如一个矢量电压计。

在操作中, 平移平台 2 位于一个零位移设定, 且来自源 8 的初级 rf 电信号和来自探头 14 的次级 rf 电信号之间的相对相位得到记录。当步进马达 2 移动时, 压电 SAW 基底 4 相对于固定探头 14 移动, 从而改变了从传感器 6 至探头 14 的表面声波的路径长度。这种路径长度变化改变了由探头 14 抽取的表面声波的相位, 从而改变了被送到相位检测器 16 的次级 rf 电信号的相位。因此, 来自源 8 的初级 rf 电信号与来自探头 14 的次级 rf 电信号的相对相位, 改变了与平移平台 2 的移动直接有关的一个量。

rf 电信号通常具有约 1GHz 的频率,这将在典型的 SAW 基底 4 中引起波长在 3 和 8 微米之间的表面声波。因此,检测器 16 所测量到的相对相位 1° 的改变,对应于 $1/360$ 乘以探头 14 所抽取的表面声波的波长的平移平台 2 的位移。例如,如果在 SAW 基底上产生的表面声波具有 3000nm 的波长,则相位检测器检测到的 1° 的相对相位改变对应于约 8nm 的位移。如果图 1 的设备根据表面声波的波长而具有在大约 1 和 4nm 之间的空间分辨率,则先有技术的相位检测器能够测量精度至少 0.2° 的相对相位。

图 2 所示的本发明的实施例采用了体声波而不是表面声波作为中间信号。图 2 的设备包括一个激光器 26,它应该是一个稳定的光源,即它具有大的相干长度和恒定的强度,并具有适当的功率,以提供良好的信号噪声比。可采用具有大约 100 米的相干长度的氦氖激光器。来自激光器 26 的激光束被一个凸透镜 28 聚焦(虽然聚焦并不总是必需的)到一个声—光布拉格传感器 20 中。布拉格传感器 20 的声波介质应该具有低的声波损耗(这意味着采用单晶)、稳定、能够以可接受的成本以大的尺寸(几 cm)得到、光学透明并最好在其安装状态下具有小的或为零的声速有效温度系数。布拉格传感器 20 的该声波介质可以是诸如石英、蓝宝石、GaP、 LiNbO_3 、 MgAl_2O_4 或 Al_2O_3 。该布拉格传感器 20 被刚性地安装(例如直接用螺栓安装)在一个平移平台 22 上,而平移平台 22 能够以亚微米的递增得到电步进。一个声波传感器 24 位于布拉格传感器 20 的一端,且一个初级 rf 电信号从一个网络分析器 32 经过一个功率放大器 30 被送到传感器 24。网络分析器 32 可被图 1 的相位检测器 16 和稳定 rf 源 6 所代替。声波传

感器 24 在布拉格传感器 20 中引起 rf 体声波。

如果测量是在几厘米的长度上进行,即所需的行进为几厘米,则布拉格传感器 20 必须具有几厘米的长度,且传感器 24 产生的声波必须以准直束的形式行进几厘米。因此传感器 24 的直径 D 必须满足: $D^2/l_{\text{acoustic}} > \text{所需的行进距离}$,其中 l_{acoustic} 是声波的波长。由于 l_{acoustic} 将为 5 微米的量级, D 应该是在 1mm 的量级且声波布拉格传感器 20 应该具有大约 1cm^2 的横截面积,以避免声波从其侧壁的反射。以上假定了在声学上各向同性的介质。1mm 的传感器直径比一般所可能采用的要大,以造成低的电阻抗。然而,所需的传感器 24 的电带宽与大多数其他应用相比是适中的,以使传感器 24 能够在没有什么困难的情况下与例如 50 欧姆的源在电学上匹配。可采用诸如接合的 LiNbO_3 传感器。

当激光束被射到布拉格传感器 20 上时,从该传感器产生出两条光束 34、36。声波传感器 24 的驱动功率最好是这样的,即使得激光束的大约 50% 被偏转而留下 50% 未被偏转,因为这使从光电二极管 44 出来的信号达到最佳。偏转的光束 36 的频率为 $W_0 + W$, 其中 W_0 是激光束的频率且 W 是来自网络分析器 32 的初级 rf 信号的频率,该光束 36 通过透镜 38 而射到分束器 40 上。未偏转的光束 34 的频率是 W_0 , 且光束 34 通过透镜 38 和镜 39 而射到分束器 40 上,分束器 40 可以是一个立方体分束器。透镜 38、镜 39 和分束器 40 的设置,保证了偏转和未偏转的光束 36 和 34 分别重叠,且当它们经过一个透镜 42 而被聚焦到一个 2GHz 带宽光电二极管 44 时具有平行的波前和相同的极性。光电二极管 44 最好具有尽可能大的面积,以便能

够截获合成激光束 34 和 36, 后者如果未由诸如透镜 42 的透镜进行聚焦的话其直径可大至 1mm。来自光电二极管 44 的次级 rf 电信号随后被经过一个 3dB 衰减器 46 (它为光电二极管 44 形成直流返回通路) 和一个前置放大器 48 而被提供到网络分析器 32。网络分析器 32 测量来自网络分析器 32 的初级 rf 电信号与来自前置放大器 48 的次级 rf 电信号的相对相位。

在操作中, 平移平台 22 处于零位移设定, 且来自网络分析器 32 的初级 rf 电信号与来自前置放大器 48 的次级 rf 电信号之间的相对相位得到记录。当步进马达 22 移动时, 声—光布拉格传感器 20 相对于从激光器 26 经过透镜 28 射入传感器 20 的激光束移动。激光束与 rf 体声波之间详细的声—光作用, 是衍射与反射的复杂的混合, 在这里不对其进行详细讨论, 但激光束有效地代替了图 1 中的固定机械探头 14。在传感器 20 中经过散射的偏转的光束 36 包含了 rf 体声波的相位。因此当步进马达 22 进行位移时, 体声波在与激光束发生作用之前从传感器 24 行进的路径长度被改变了。因此, 与激光束进行作用的体声波的相位发生了移动, 该移动使偏转光信号 36 的相位发生了移动。来自光电二极管 44 的次级 rf 电信号包含该相位移动, 所以来自网络分析器 32 的初级 rf 电信号与来自前置放大器 48 的次级 rf 电信号之间的相对相位被改变了。因此, 网络分析器 32 所测量到的相对相位改变了一个与步进马达 22 的运动直接有关的量。

rf 信号一般具有大约为 1GHz 的频率, 它将在典型的声—光布拉格传感器 20 中引起波长在 3 和 8 微米之间的体声波。因此由网络分析器测量到的 1° 的相对相位改变, 对应于平移平台 22 的位移为 $1/360$ 乘以与激光束进行作用的声波的波长。例如, 如果在布拉格传

感器 20 中引起的体声波的波长为 3000nm, 则网络分析器 32 测量到的 1° 的相对相位改变对应于 8nm 的位移。先有技术的相位检测器能够以至少为 0.2° 的精度测量相对相位, 这使得图 2 的设备根据体声波的波长能够具有大约 1 和 4nm 之间的空间分辨率。

通过取消透镜 38 和 42 并使镜 39、分束器 40 和光电二极管 44 尽可能地与布拉格传感器 20 接近, 可以使图 2 的设置更为稳定。这降低了部件的振动的影响, 降低了在光束 34 和 36 被空间分开的关键区域中的空气涡流的影响, 并降低了当激光的相干长度与路径长度差具有相同的量级时所引起的不精确性。在光束 34 和 36 被分开处的空气涡流, 可通过在该区域中采用一块玻璃而得到消除。

在图 3a 的设备中, 中间信号是光信号。图 3a 所示的设置与图 2 所示的类似, 只是声—光布拉格传感器 20 被固定且所要测量的位移改变了偏转光波 36 的路径长度。图 3a 的设备包括一个激光器 26, 来自它的激光束被引向被固定的布拉格传感器 20。布拉格传感器 20 所引起的要求比图 2 的设置低, 因为不再需要大的声波路径。最好采用较慢的声波介质, 例如 TeO_2 , 因为它能够以适中的频率提供光束 34 和 36 的大的角分离。一个声波传感器 24 位于布拉格传感器 20 的一端, 且来自一个稳定的 rf 源 50 的初级 rf 电信号被输入到传感器 24 中。与图 2 的设置类似, 声波传感器 24 在布拉格传感器 20 中引起 rf 体声波。因此当激光束被引进布拉格传感器 20 时, 从该传感器中出来了两个激光光束 34 和 36。

未偏转光束 34 被引向分束器 58。偏转光束 36 经过一个分束器 52 而被引向一个镜 56。从镜 56 反射的光束经过分束器 52 被引向分

束器 58。镜 56 被安装在平移平台 22 (未显示) 上, 以使镜 56 沿着箭头的方向移动。镜 56 的移动因而改变了光束 36 的路径长度。分束器 58 的设置保证了偏转和未偏转光束 36 和 34 在入射到光电二极管 60 上时分别重叠并具有平行的波前和相同的极性。来自光电二极管 60 的次级 rf 电信号随后被提供到一个矢量电压计 62, 后者对来自光电二极管 60 的次级信号和来自 rf 源 50 的初级信号之间的相对相位进行测量。为了改善效率, 可把分束器 52 制成偏振分束器, 并以适当的方式与四分之一波片和二分之一波片一起使用, 从而保证到达检测器的光束具有相同的极性。

当使镜移动一个位移 d 时, 偏转信号 36 的路径长度改变了 $2d$, 这造成了偏转信号 36 的一个相位改变, 该改变以度来表示时为

$$360 (2d/l_{\text{optical}})$$

其中 l_{optical} 是偏转信号 36 的波长。因此如果矢量电压计测量到 1° 的相对相位改变, 则对于一般为 500nm 的光波长, 图 3 的平移平台的位移为

$$(l_{\text{optical}}/2)/360 \quad 1\text{nm}$$

布拉格传感器 20 的作用, 是产生频移操作, 而且也可以采用其他的技术, 诸如 rf 驱动集成光相位或幅度调制器或单边带混频器。布拉格传感器 20 的确具有本身为一个单边带混频器的优点, 并自然提供了干涉仪所需的频移和未频移的光束的空间分离。

图 3b 显示了图 3a 的一种修正形式, 并采用了相同的标号来表示设备的相同的部分。图 3b 中的设备的工作方式与图 3a 的相同, 只是未偏转光束 34 而不是偏转光束 36 得到了相移。

作为对图 1 中采用检测器 16 的一种替换, 图 2 的网络分析器 32 或图 3a 和 3b 的矢量电压计 62 采用了简单的双平衡混频器, 后者对于恒定的次级 rf 电信号和初级 rf 电信号的电平大体具有带有相位的正弦输出, 且所述输出在 90° 相位差处为零。此时可通过计数周期 (即 360° 的相位改变) 来对平移平台的位移进行粗测量, 并随后通过对输入到传感器的 rf 信号的频率进行调节以恢复到零输出 (90° 相位差) 状态来进行细测量。对恢复 90° 相位差所需的频率改变, 能够以很高的精度进行测量。这种替换的优点是只在一个点即零输出点进行的操作, 它对于初级和次级 rf 电信号的幅度变化是不敏感的。另一种可能是借助一个本机振荡器对初级和次级 rf 电信号进行向下混频, 以使相位测量能够在较低的方便的频率上进行。

有两种声—光作用, 即各向同性作用和各向异性作用。以上的描述假定为各向同性的声—光作用。在上述的设备中, 也能够采用其中偏转的光信号被相移了 90° 的各向异性声—光作用, 只要对 90° 相移进行补偿从而使得偏转和未偏转的光信号在它们入射到光电二极管上时重叠并具有平行的波前和相同的极性。

图 1

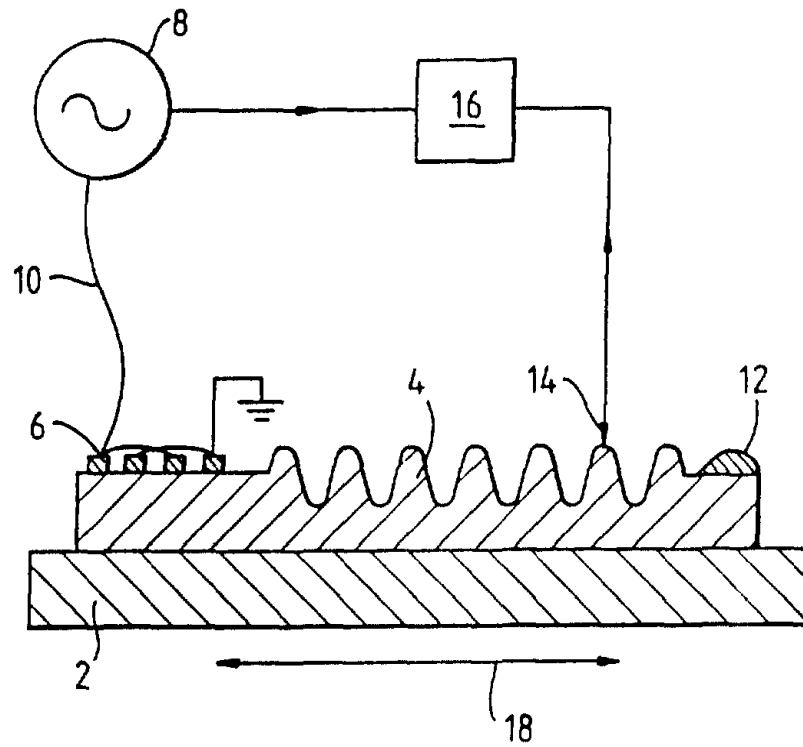


图 2

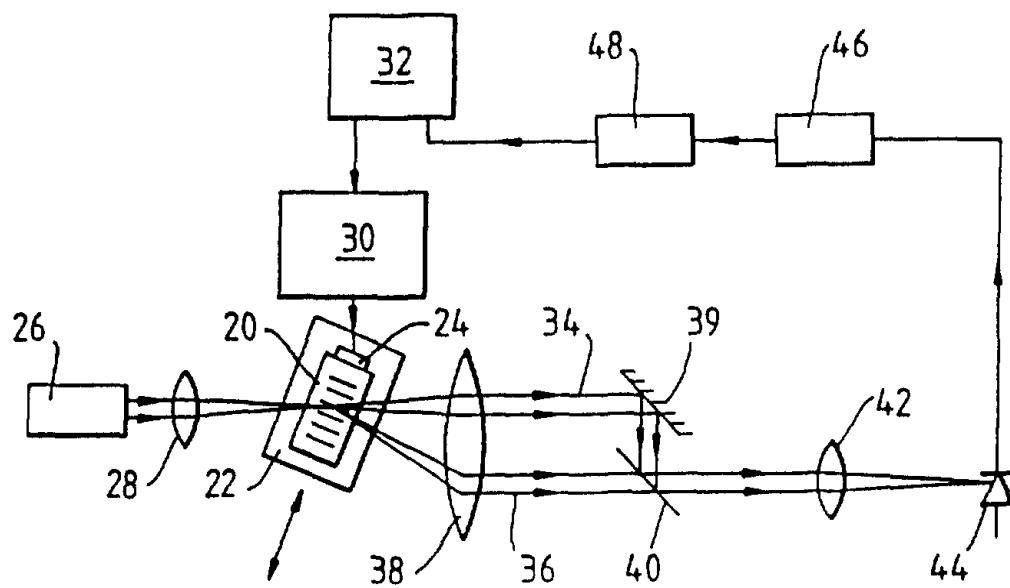


图 3a

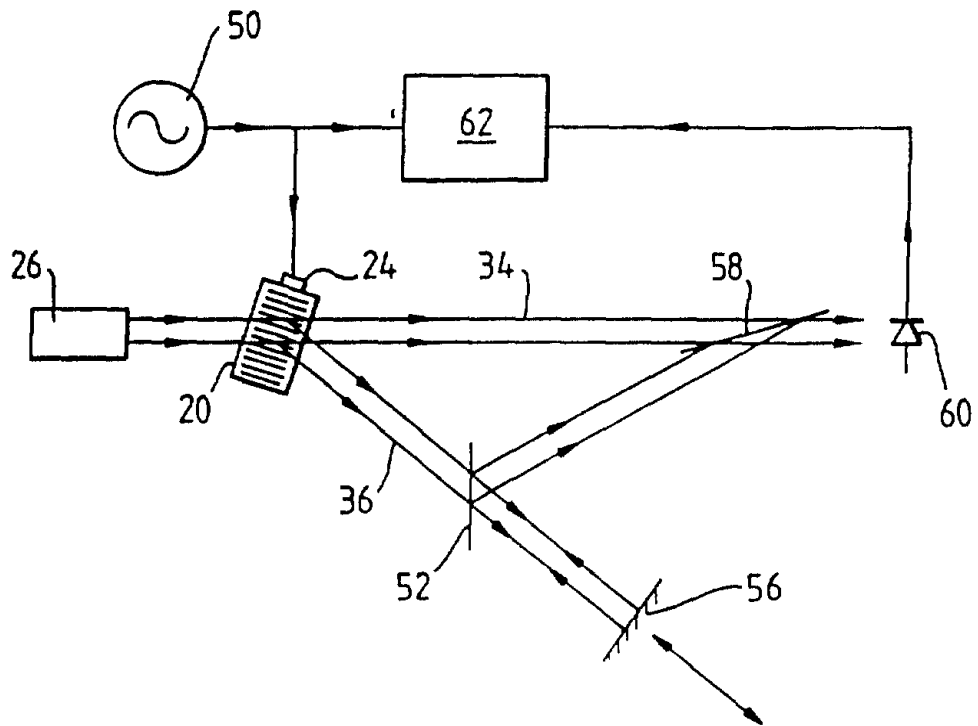


图 3b

