

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl.
G01R 33/032 (2006.01)



[12] 发明专利说明书

专利号 ZL 96198394.9

[45] 授权公告日 2006 年 3 月 29 日

[11] 授权公告号 CN 1248008C

[22] 申请日 1996.9.12 [21] 申请号 96198394.9

[30] 优先权

[32] 1995.11.22 [33] US [31] 08/561,810

[86] 国际申请 PCT/US1996/014579 1996.9.12

[87] 国际公布 WO1997/019361 英 1997.5.29

[85] 进入国家阶段日期 1998.5.18

[71] 专利权人 美国 3M 公司

地址 美国明尼苏达州

[72] 发明人 J·W·道森 T·W·麦克道盖尔

审查员 王晓萍

[74] 专利代理机构 上海专利商标事务所有限公司

代理人 李 玲

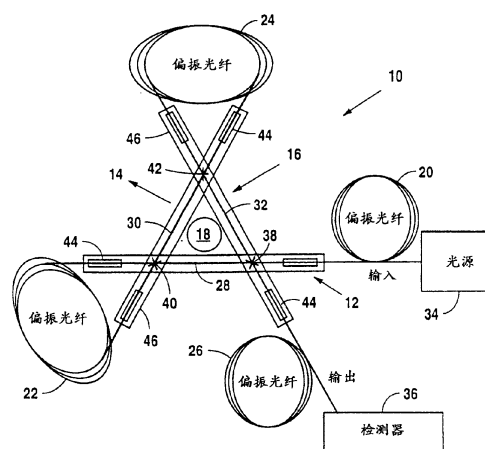
权利要求书 4 页 说明书 7 页 附图 2 页

[54] 发明名称

串联磁光场传感器

[57] 摘要

本发明提供一种法拉第效应电流传感器，一般包括：光源、至少两个包括输入和输出的法拉第效应传感单元、将光源与第一传感单元的输入耦合的装置、将第一传感单元的输出与第二传感单元的输入耦合的装置、光学检测器以及将第二传感单元的输出与光学检测器耦合起来的装置。传感单元一般是直的光纤段，它们可以排列构成普通的多边形，例如三个单元传感器组成等边三角形。通过合适地选择每个传感单元偏角的数值可以改善传感器响应的线性度。该数值定义为与给定传感光纤相连的两个偏振光纤慢轴之间的夹角，优化值为 $\arctan [1/\sqrt{(2n-1)}]$ ，这里 n 为传感单元数量。本发明还适于用作差分电流传感器，其中每个单元位于分立的包内，从而使得单元位于 Y 分支上不同导体附近或者不同位置的同一导体上。



1. 一种检测导体内流过的电流的装置，其特征在于，它包括：

光源；

具有输入和输出的第一法拉第效应传感单元；

将所述光源与所述第一传感单元的输入耦合的第一装置；

具有输入和输出的第二法拉第效应传感单元；

将所述第一传感单元的输出与所述第二传感单元的输入耦合的第二装置；

光学检测器；以及

将所述第二传感单元的输出与所述光学检测器耦合起来的第三装置；

一个或多个附加的法拉第传感单元；以及

用来在所述第一传感单元和第二传感单元之间串联耦合所述附加传感单元的对应装置，其中，所述第一、第二以及附加传感单元是直光纤段，它们排列构成规则多边形，使得所述装置不会由于弯曲而产生双折射效应；

所述第一传感单元包括具有第一和第二端的第一传感光纤，所述第一端与所述光源耦合；

所述第二传感单元包括具有第一和第二端的第二传感光纤；

所述第二耦合装置和用于任意选择的附加的法拉第传感单元包括一个偏振光纤。

2. 如权利要求 1 所述的装置，其特征在于所述第一传感单元固定在包围导体第一部分的第一包上，并且所述第二传感单元固定在包围导体第二部分的第二包上，从而使得装置可以用作差分电流传感器。

3. 如权利要求 1 所述的装置，其特征在于包括至少三个法拉第效应传感单元从而使传感单元的总数可以多达 n 个，还包括在所述第一和第二传感单元之间串联耦合所述附加传感单元的附加装置，其中：

所述第一、第二和附加传感单元的每一个包括传感光纤；

所述附加耦合装置的每一个包括偏振光纤；以及

其中一个给定的所述传感光纤的偏角定义为两个偏振光纤慢轴之间的夹角，所述偏角大约等于 $\arctan[1/\sqrt{(2n-1)}]$ 。

4. 如权利要求 1 所述的装置，其特征在于包括一个或多个附加的法拉第效应传感单元以及在所述第一和第二传感单元之间串联耦合所述附加传感单元的附加装置，其中：

所述附加耦合装置的每一个包括偏振光纤；

所述第一、第二和附加传感单元的每一个包括附着在至少一个所述偏振光纤不同叠加位置上的传感光纤；以及

所述叠加位置排列为使所述传感光纤构成位于导体附近的基本闭合的路径。

5. 如权利要求 1 所述的装置，其特征在于所述第一和第二传感光纤一般都是直光纤截面的。

6. 如权利要求 1 所述的装置，其特征在于所述第一和第二传感光纤都是不退火的。

7. 如权利要求 1 所述的装置，其特征在于所述传感光纤利用熔化叠加方式叠加在所述偏振光纤上。

8. 如权利要求 1 所述的装置，其特征在于：

所述第一、第二、第三和附加传感单元的每一个包括偏振光纤；

所述光纤段的每一个附着在至少一个所述偏振光纤不同的叠加位置上；以及

所述叠加位置排列为使所述传感光纤段构成位于导体附近的基本闭合的路径。

9. 如权利要求 3 所述的装置，其特征在于有并且只有三个光纤段；以及所述三个光纤段排列成等边三角形。

10. 如权利要求 8 所述的装置，其特征在于：

总共可以有多达 4 个法拉第效应传感单元，每个包括所述光纤段；以及其中一个给定的所述传感光纤的偏角定义为两个偏振光纤慢轴之间的夹角，所述偏角大约等于 $\arctan[1/\sqrt{(2n-1)}]$ 。

11. 一种检测变化磁场的法拉第效应的产品，其特征在于，它包括：

至少三个法拉第效应场传感器，每个包括传感光纤的直线段，所述传感光纤段排列成规则多边形；以及

将所述场传感器串联耦合的装置，所述耦合装置包括多个偏振光纤，它们分别介于所述传感光纤段之间。

12. 如权利要求 11 所述的产品，其特征在于进一步包括：

光源；

将所述光源与所述传感光纤段的第一个耦合的第一装置；

光学检测器；以及

将所述传感光纤段最后一个与所述光学检测器耦合起来的装置。

13. 如权利要求 11 所述的产品，其特征在于：

总共有 n 个场传感器；以及

其中一个给定的所述传感光纤段的偏角定义为两个偏振光纤慢轴之间的夹角，所述偏角大约等于 $\arctan[1/\sqrt{(2n-1)}]$ 。

14. 如权利要求 11 所述的产品，其特征在于：

每个所述传感光纤段附着在至少一个所述偏振光纤的不同叠加位置上；以及

所述叠加位置排列为使所述传感光纤段构成位于导体附近的基本闭合的路径。

15. 如权利要求 11 所述的产品，其特征在于每个所述传感光纤段安装在刚性衬底上并且在张力下保持固定。

16. 一种差分电流传感器，其特征在于包括：

光源；

包括输入和输出的第一法拉第效应场传感器，所述第一场传感器固定在包围第一导体的第一包上；

将所述光源与所述第一场传感器的输入耦合的第一装置；

包括输入和输出的第二法拉第效应场传感器，所述第二场传感器固定在包围第二导体的第二包上；

将所述第一场传感器的输出与所述第二场传感器的输入耦合的第二装置；

光学检测器；以及

将所述第二场传感器的输出与所述光学检测器耦合起来的第三装置，从而使来自所述光源的光信号在到达所述检测器之前首先通过所述第一场传感

器并且随后通过所述第二场传感器。

17. 如权利要求 16 所述的差分电流传感器，其特征在于所述第一、第二和第三耦合装置分别包括第一、第二和第三偏振光纤。

18. 如权利要求 16 所述的差分电流传感器，其特征在于所述第二耦合装置包括直接将所述第一第一场传感器的所述输出与所述第二场传感器的所述输入连接起来的熔化叠加片。

串联磁光场传感器

(1) 技术领域

本发明一般涉及法拉第效应光纤光电流传感器，具体而言，涉及利用多个串联场传感器(分立的传感光纤)的改进传感器。

(2) 背景技术

对磁场灵敏的光纤是人们熟知的产品，并且被越来越多地用作例如电功率设备中的光电流换能器(OCT)。典型的OCT采用包围在导体外面的单模光纤构成的线圈。由于磁光法拉第效应(又称法拉第旋转或Kundt效应)，光纤线圈中传输光线的偏振度随通过导体电流的变化而变化。在法拉第效应下，当线偏振光沿施加磁场方向通过物质时，其偏振度发生旋转，并且法拉第效应是法拉第双折射的结果。在法拉第双折射中，沿施加磁场方向通过物质的左右圆偏振光的折射率是不同的。有关场敏光线的细节可以参见美国专利 No. 5, 051, 577，该专利已经转让给本发明的受让人。

许多现有的技术文献都提及OCT的特性受温度影响而发生相当大的变化，迄今为止尚无满足 $-40^{\circ}\text{C} \sim +80^{\circ}\text{C}$ 温度变化范围内工作要求的高精度OCT。现有的技术发现温度对传感线圈的影响涉及三种方式：(i)改变了传感光纤中的双折射；(ii)由于包裹传感光纤材料的应力变化而使双折射变化；(iii)改变了光纤芯体材料的Verdet系数。为了尽可能减少温度变化的影响，设计出了许多技术。大多数的基本技术是根据经验数据来对输出进行补偿，即在实际测量中利用温度计确定温度并由后续电子线路据此调整输出。在美国专利 No. 5, 416, 860 中揭示了一种更为复杂的这类技术。该系统不仅需要额外的电子线路处理，并且需要增加光电流元件，从而提高了单元成本。在美国专利 No. 5, 382, 901 中揭示了另一种较为复杂的技术，它利用分束器并涉及两种偏振元件的处理。还可以参见的是欧洲专利申请 No. 657, 740。有一种不同的方法是如美国专利 No. 5, 463, 312 所揭示的那样，通过在制造过程中尽量减少传感光

纤的双折射(例如使光纤旋转),随后将线圈形式退火以尽量减少温度依赖性。正如“不同双磁玻璃中 Verdet 系数温度依赖性”一文(《应用光学期刊》Vol. 30, No. 10, pp. 1176-1178(1991 年 4 月 1 日出版))中所揭示的那样,采用特殊的材料作传感光纤也可以尽量减少 Verdet 系数变化引起的起伏。

温度敏感性的原因也可以是弯曲诱导双折射。例如,当单根传感光纤被排列在位于载流导体附近的两个或更多的直线段内并且光纤在直线段端部形成环时就可能发生这样的情况。在“法拉第旋转光纤光电流传感器中双折射元件几何结构分立”一文(《应用光学快报》Vol. 16, No. 9, pp698-689(1991 年五月 1 日出版))所介绍的传感头中,通过选择合适的环几何参数(半径和匝数)从而使弯曲诱发双折射是 2π 的倍数,将这种效应减小到了最低限度。在上述传感头中,单根光纤在导体附近形成正方形的四个直线段。虽然这种结构抑制了弯曲诱导的双折射,但是它也存在将传感器安装在“无端部”光缆(即现有的无法从传感器穿线的光纤)上这一 OCT 的共有缺点。通过在线圈环或者正方形传感器光纤侧面提供足够的空间,可以在结构上保证传感器线圈和正方形传感器在无端部光缆上放置,但是这增加了传感器的体积并且可能会影响精度。因此设计一种温度依赖性有所改善而又易于安装在已有光缆上的光纤光电流传感器。如果这种传感器无需特殊的材料、特殊的光学元件或者特殊处理就可以制成,则它的优点更为明显。

(3)发明内容

本发明提供一种法拉第效应电流传感器,一般包括:光源、至少两个包括输入和输出的法拉第效应传感单元、将光源与第一传感单元的输入耦合的装置、将第一传感单元的输出与第二传感单元的输入耦合的装置、光学检测器以及将第二传感单元的输出与光学检测器耦合起来的装置。在较佳实施例中,第一和第二传感单元是单模传感光纤分立的部分,通常每个都固定在直线方向上,并且各种耦合装置包括融合叠加在传感光纤端部上的偏振光纤。该装置可以包括两个以上的传感单元,增加的偏振光纤与该单元串联。

传感单元一般是直的光纤段,它们可以排列构成规则多边形,例如三个单元传感器组成等边三角形。传感光纤段可以安装在刚性衬底上并在张力下固

定。利用直传感光纤省略了制造过程中为抑制双折射而进行的光纤退火。传感光纤与偏振光纤之间拼接的位置的排列可以使传感光纤形成基本闭合的路径，而该路径位于载流导体附近。

通过合适地选择每个传感单元偏角的数值可以改善传感器响应的线性度。该数值定义为与给定传感光纤相连的两个偏振光纤慢轴之间的夹角，优化值为 $\arctan[1/\sqrt{(2n-1)}]$ ，这里 n 为传感单元数量。本发明还适于用作差分电流传感器，其中每个单元位于分立的包内，从而使得单元位于 Y 分支上不同导体附近或者不同位置的同一导体上。

(4) 附图说明

借助以下附图将能更好地理解本发明：

图 1 为采用串联场传感器的本发明电流传感器顶视图；

图 2 为与普通电流传感器相比的本发明电流传感器响应曲线图；

图 3 为按照本发明的差分电流传感器示意图；

图 4 为图 3 差分电流传感器响应曲线图。

(5) 具体实施方式

参见附图 1，它示出了本发明光纤光电流传感器 10 的实施例。电流传感器 10 一般由靠近相邻载流导体 18 的三个串联场传感器 12、14 和 16 以及几个邻接光纤 20、22、24 和 26 构成。每个场传感器基本上是独立的法拉第传感光纤片，因此第一场传感器 12 包括第一传感光纤 28，第二场传感器 14 保第二传感光纤 30，并且第三场传感器 16 包括第三传感光纤 32。光纤 20 为输入光纤，它将条件光信号从光源 34(例如光发射二极管、激光二极管或者超荧光二极管)输送至第一传感光纤 28。光纤 22 使第一传感光纤 12 与第二传感光纤 14 互连，而光纤 24 使第二传感光纤与第三传感光纤 14 互连。光纤 26 为输出光纤，它将场修改光信号输送至检测器 36(例如光电二极管)。

术语“串联”指的是场传感器串联的方式。就此而言，本发明的电流传感器可以串联任意数量的场传感器。即，至少必须有两个场传感器并且必须至少有一个与场传感器互连的光传输介质，这里互连的介质对法拉第效应不敏感，

或者也可以直接将两个场传感器连接在一起。比较好的是至少有三个场传感器，排列成(等边)三角形。如果采用三个以上的场传感器，这比较好的是将它们排列为规则多边形。虽然其它手段(例如机械叠加)也是可以应付的，但是所有的光纤比较好的是借助熔化叠加手段附着。叠加点比较好的是在导体 18 周围构成一个闭合的路径或环路，从而更为精确地计量周围磁场。换句话说，输入光纤 20 与第一传感光纤 28 之间的叠加位置 38 与输出光纤 26 与第三传感光纤 32 之间的叠加位置是相邻的，或者是交叠的。同样，第一传感光纤 28 与连接光纤 22 之间的叠加位置 40 交叠在连接光纤 22 与第二传感光纤 30 之间的叠加位置上。而第二传感光纤 30 与连接光纤 24 之间的叠加位置 42 交叠在连接光纤 24 与第三传感光纤 32 之间的叠加位置上。叠加点比较好的是根据三个以上场传感器的变化而交叠。在这种方式下，串联场传感器接近完美的电流传感器，其测量误差在许多应用中可以忽略不计。

光纤可以由任何合适的装置支承。在较佳实施例中，输入和输出光纤 20 和 26 以及连接光纤 22 和 24 通过用粘合剂粘合到固定块 44 上达到固定目的。块 44 依靠在石英棒 46 上，并且也可以用胶水固定。

在图 1 所示实施例中，每个传感光纤(场传感器)一般为直的光纤段，即可以略微偏离完美的直线但光纤决不是曲线。这避免了弯曲诱导双折射参数的不利影响，并且无需对传感光纤退火。直线段也可以在张力下更为容易地固定，这样对温度的敏感性较小。毫无疑问，传感光纤可以弯曲得更接近导体附近的圆圈，但是如果这样，它们比较好的是进行退火以抑制双折射效应。

通过提供分立的互相耦合的传感光纤部分，简化了安装过程。由于在安装过程中单元可以相对另一单元移动，例如无需切割光缆就可以将传感器放置在已有(无端部)光缆附近，所以这种结构向电流传感器 10 提供了灵活性。由于视在转动角度(这种类型传感器中温度变化的主要原因)跟随传感器单元平均的均方根变化，所以提供多个场传感器降低了温度的依赖性，使得随着场传感器数量的增加而使温度稳定性更强。

通过将传感器设计成所有传感单元的磁光旋转相同并且偏角等于 $\arctan[1/\sqrt{(2n-1)}]$ ，这里 n 为传感单元数量，传感器对电流的响应与普通磁光电流传感器相比更加线性化(“偏角”指的是传感光纤每端上光纤之间的偏

振角，即偏振光纤慢轴之间的夹角；“磁光旋转”指的是目标电流诱发的偏振角变化。角度值可通过使调制转移函数最大化而导出。因此对于 $n=3$ 的情况(图 1)，偏振器之间的优化角度为 $\arctan(1/\sqrt{5})=24.1^\circ$ 。这种情况下传感器的灵敏度为 $1/\sqrt{(2n-1)}$ 并且传感器损失随着 n 变大而逼近 $1/\sqrt{e}$ ；这里灵敏度相对标准的单环光纤光电流传感器而言。如图 2 所示，与单环光纤光电流传感器相比，在扩展的电流量程内本发明传感器的响应更加线性；线 A 表示实际的电流，线 B 表示普通传感器的响应，线 C 表示 $n=3$ 时电流传感器 10 的响应。测试还表明图 1 传感器的温度响应基本上只受光纤材料 Verdet 系数温度依赖性的限制，即几乎是完美的理论性能；这是第一个具有这种性能的单检测器、非退火电流传感器。正如美国专利申请 No. 08/539, 059 所揭示的那样，Verdet 温度依赖性可以进一步通过在一定偏角处附着光纤得到补偿。

如果导体不是位于传感器中心(即在图 1 中传感器光纤构成的等边三角形中心)，则传感器的响应可能会变化，但是假定导体位置偏离中心不超过多边形内接圆的 10%，则响应线性度的偏离可以忽略不计，所以导体并不需要严格定位于中心。如果场源到传感器的距离远远大于传感器的尺寸，则外部磁场对传感器的影响同样忽略不计。

用于本发明的较佳类型的光纤可以从位于 Connecticut 州的 West Haven 的 3M 特殊光纤公司得到。每根光纤 20、22、24 和 26 比较好的是货号为 FS-PZ-4611/200SA 的偏振(PZ)光纤(工作波长为 850 纳米)。传感光纤 28、30 和 32 比较好的是货号为 FS-SM-4611 的纺成单模光纤(工作波长为 780 纳米)。块 44 比较好的是由显微片支承的石英片并且切割成 $1/8'' \times 1/2'' \times 1$ 毫米片。硅铝衬底 46 由纽约州 Yonkers 的 AC 技术公司提供的货号为 ACMA-1100 的产品制成。粘合光纤的胶水是 New Jersey 的 New Brunswick 提供的 UV 凝固环氧树脂 NOA#72。将块 44 粘合到棒 46 上的胶水购自 Danbury, CT 的电子材料公司，货号为 XP1060-930-45-1A。光源 22 的激光二极管包从 England 的 Winchester 的点光源公司获得，货号为 LDS-Pz-3-K-780-0.5-TE。点光源公司包中的超荧光二极管由加拿大的 Vaudreuil 的 EG&G 光电子公司制造。较佳的检测器 34 是 Florida 的 Orlando 的 Graseby 光电子公司的 Si 光检测器，货号为 260。

可以采用其它类型的磁光检测介质代替单模光纤，例如大块玻璃、YIG(钇

铁石榴石晶体)等。也可以采用其它类型的偏振器,包括大块光纤偏振器(例如购自日本 Sumitomo 电子公司的 LAMIPOL 或者购自纽约 Corning 公司的 Corning 玻璃 POLARCOR)。

如图 3 所示,串联场传感器的概念也可以用于差分电流传感器。差分电流传感器一般包括光源 52、第一场传感器 54、将条件光信号从光源 52 传输至第一场传感器 54 的输入光纤 56、第二场传感器 58、将第一场传感器 54 与第二场传感器 58 互联的连接光纤 60、检测器 62 和向检测器 62 传送场修正光信号的输出光纤 64。检测器 62 一般与信号处理电子线路连接或集成在一起。差分电流传感器 50 通过将两个场传感器沿着导体 Y 分支不同位置放置测量电流, Y 分支包括一条输入线 66 和两条输出线 68 和 70。在图 3 所示的位置上,场传感器 54 放置在第一输出线 68 部分的附近,而第二场传感器 58 被放置在输入线 66 部分的附近。场传感器 54 和 58 之间的串联连接使得输出正比于两个传感器之间流动电流之差。

本发明的差分电流传感器可以放置在单个导体的不同位置上从而监视电流的连续性。对于传感器之间较长的距离,比较好的是采用标准单模光纤来连接两个传感器。在这种情况下,传感器需要在两个传感器光纤之间有去偏振器。传感器必须标度并且具有好的特性曲线灵敏度从而进行准确的差分测量。这种结构大多数用于较大的电流差(例如同一线路上两个传感器之间的短路)。

场传感器 54 和 58 可以是普通的传感线圈或者传感器 10,它们包括串联在一个包内的多条传感光纤。其余的元件与上述相似。与已有技术的差分传感器不同,差分电流传感器 50 只采用单光源和一个检测器。与已有技术的差分传感器相比,这种结构简化了使用,提供了可靠性并且降低了成本,而且无需担心对连接光纤的干扰,而这会改变传播中光波的偏振状态。图 4 示出了差分电流传感器 50 的工作原理。导体第一部分与第一传感单元的相互作用改变了从第一传感单元出射的光波。位于导体第二部分的第二传感单元将第二次修改光波。如果相互作用的强度相同而符号相反(通过两个传感器的电流相同),则光波修改的最终结果为零。如果导体两个部分的电流不同,则光波的净修改不为零。这表现为非零输出信号。

虽然以上借助实施例对本发明作了描述,但是本发明的精神和实质由后面

所附权利要求限定。

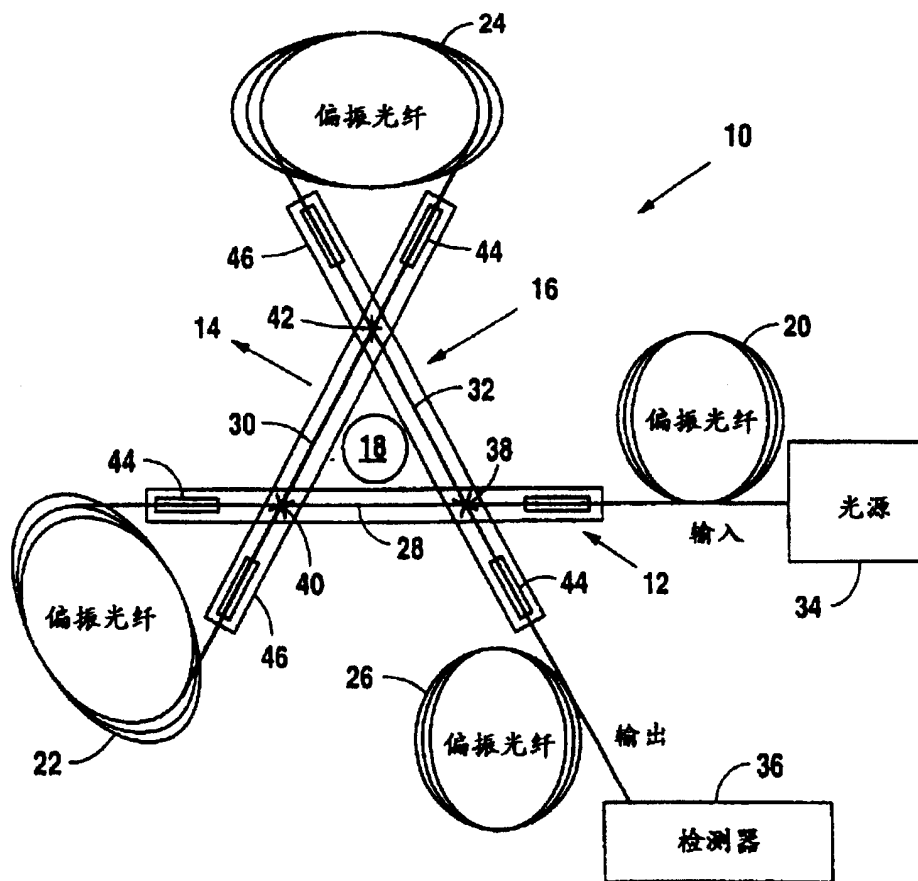


图 1

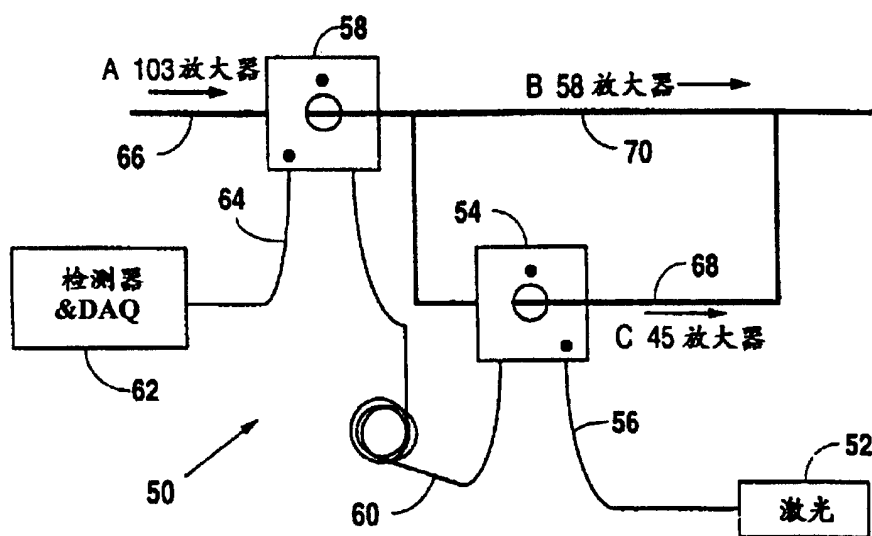


图 3

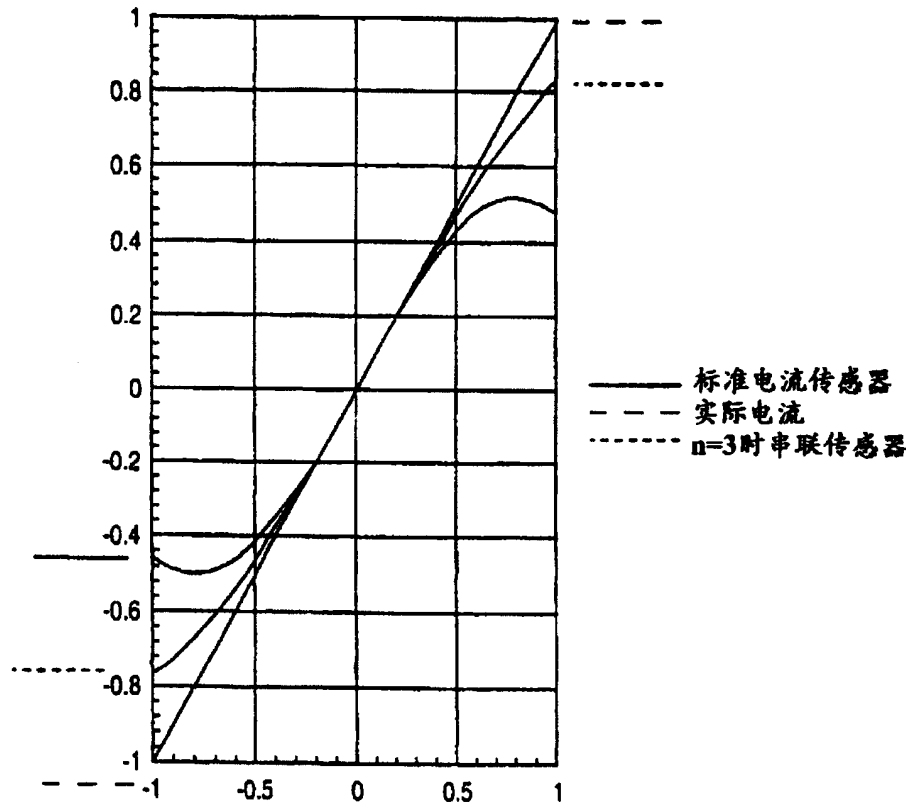


图 2

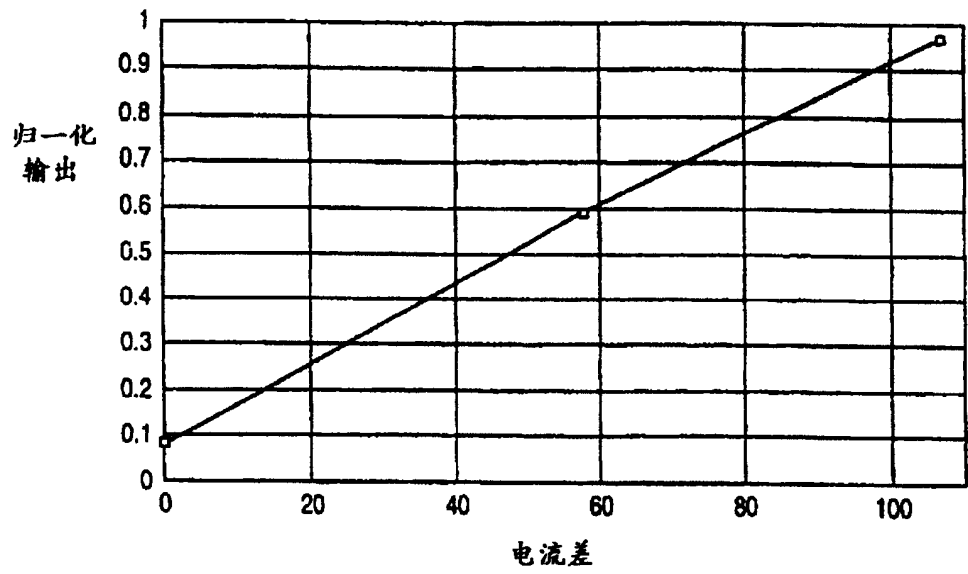


图 4