

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl⁷

G01L 1/24

G01L 11/02



[12] 发明专利说明书

[21] ZL 专利号 98808910.6

[45] 授权公告日 2004 年 1 月 21 日

[11] 授权公告号 CN 1135373C

[22] 申请日 1998.7.2 [21] 申请号 98808910.6

[30] 优先权

[32] 1997. 7. 7 [33] US [31] 08/888566

[86] 国际申请 PCT/US98/13912 1998. 7. 2

[87] 国际公布 WO99/02953 英 1999. 1. 21

[85] 进入国家阶段日期 2000. 3. 7

[71] 专利权人 施卢默格海外有限公司

地址 巴拿马马拿马城

[72] 发明人 R·J·施勒德尔 E·乌德

审查员 霍成山

[74] 专利代理机构 中国专利代理(香港)有限公司

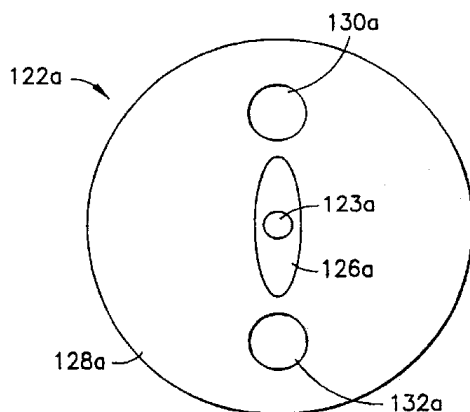
代理人 陈 霁 张志醒

权利要求书 5 页 说明书 14 页 附图 12 页

[54] 发明名称 光纤压力传感器以及包括这种压力传感器的压力传感系统

[57] 摘要

一种分辨率和动态范围提高的光纤压力传感器，包括上面刻有一个或多个光栅的光纤芯、用于增强芯的双折射的双折射结构、以及用于把各向同性压力转换为作用在光纤芯上的各向异性压力的结构。公开了几个预加应力结构的不同实施例(外在和内在)。还公开了几个把各向同性压力转换为各向异性压力的结构的不同实施例(外在和内在)。根据本发明的光纤压力传感器最好与光源和光谱分析仪一起使用，以便根据波长和光谱峰值漂移检测光纤压力传感器周围的压力。



I S S N 1 0 0 8 - 4 2 7 4

1. 一种光纤传感器，包括
 - a) 光纤芯，具有至少沿着它的一部分形成的至少一个光栅；
 - b) 包围所述芯的第一覆层；
- 5 c) 用于加强所述芯中的双折射的双折射装置，其中所述双折射装置包括位于所述芯和所述第一覆层之间的第二椭圆形覆层；以及
 - d) 压力响应装置，用于把各向同性压力转换为作用在所述芯上的各向异性压力，其中所述压力响应装置包括一对位于所述第一覆层内的纵向孔。
- 10 2. 根据权利要求1所述的光纤传感器，其中所述纵向孔设置成使得它们的纵轴与芯的纵轴位于同一平面内。
3. 根据权利要求2所述的光纤传感器，其中所述椭圆形覆层的长轴与所述侧孔和所述芯的轴位于同一平面内。
- 15 4. 根据权利要求2所述的光纤传感器，其中所述椭圆形覆层的短轴与所述侧孔和所述芯的轴位于同一平面内。
5. 一种光纤传感器，包括
 - a) 光纤芯，具有至少沿着它的一部分形成的至少一个光栅；
 - b) 包围所述芯的第一覆层；
- 20 c) 用于加强所述芯中的双折射的双折射装置，其中所述双折射装置包括一对掩埋在所述第一覆层中的长形棒；以及
 - d) 压力响应装置，用于把各向同性压力转换为作用在所述芯上的各向异性压力，其中所述压力响应装置包括一对位于所述第一覆层内的纵向孔。
- 25 6. 根据权利要求5所述的光纤传感器，其中所述孔设置成使得它们的纵轴位于还包括所述芯的纵轴的第一平面内，
所述棒设置成使得它们的纵轴位于还包括所述芯的纵轴的第二平面内，以及
- 30 所述第二平面和所述第一平面彼此相交成一角度。
7. 根据权利要求5所述的光纤传感器，其中

所述纵向孔具有 V 形横截面。

8. 根据权利要求 5 所述的光纤传感器，其中所述纵向孔具有 C 形横截面。

5 9. 根据权利要求 5 所述的光纤传感器，其中所述纵向孔具有不同直径。

10. 根据权利要求 5 所述的光纤传感器，其中所述孔设置成使得它们的纵轴位于不包括所述芯的纵轴的第一平面内。

11. 一种光纤传感器，包括

10 a) 光纤芯，具有至少沿着它的一部分形成的至少一个光栅；

b) 包围所述芯的第一覆层；

c) 用于加强所述芯中的双折射的双折射装置，其中所述双折射装置包括位于所述芯和所述第一覆层之间的第二椭圆形覆层；以及

15 d) 压力响应装置，用于把各向同性压力转换为作用在所述芯上的各向异性压力，其中所述压力响应装置包括包围所述第一覆层的毛细管，所述毛细管具有一对基本上平行于所述覆层的纵向孔。

12. 根据权利要求 11 所述的光纤传感器，其中所述孔的端部密封。

13. 根据权利要求 1 所述的光纤传感器，还包括：

20 e) 刚性衬底元件，以及

f) 柔性隔板，其中所述第一覆层设置在所述柔性隔板与所述刚性衬底元件之间。

14. 一种光纤传感器，包括

a) 光纤芯，具有至少沿着它的一部分形成的至少一个光栅；

25 b) 包围所述芯的第一覆层；

c) 用于加强所述芯中的双折射的双折射装置，其中所述双折射装置包括设置成向所述第一覆层施加力的机械结构；以及

30 d) 压力响应装置，用于把各向同性压力转换为作用在所述芯上的各向异性压力，其中所述压力响应装置包括一对位于所述第一覆层内的纵向孔。

15. 一种光纤传感器，包括

a) 光纤芯，具有至少沿着它的一部分形成的至少一个光栅；

- b) 包围所述芯的第一覆层;
- c) 用于加强所述芯中的双折射的双折射装置, 其中所述双折射装置包括设置成向所述第一覆层施加力的软玻璃元件; 以及
- d) 压力响应装置, 用于把各向同性压力转换为作用在所述芯上的各向异性压力, 其中所述压力响应装置包括一对位于所述第一覆层内的纵向孔。
- 5
16. 根据权利要求 14 所述的光纤传感器, 其中所述机械结构包括夹紧元件。
17. 根据权利要求 14 所述的光纤传感器, 其中
- 10 所述机械结构包括刚性底座和杠杆臂, 所述第一覆层位于所述底座和所述杠杆臂之间。
18. 一种光纤传感器, 包括
- a) 光纤芯, 具有至少沿着它的一部分形成的至少一个光栅;
- b) 包围所述芯的第一覆层;
- 15 c) 用于加强所述芯中的双折射的双折射装置, 其中所述双折射装置包括包围所述第一覆层的椭圆玻璃管; 以及
- d) 压力响应装置, 用于把各向同性压力转换为作用在所述芯上的各向异性压力, 其中所述压力响应装置包括一对位于所述第一覆层内的纵向孔。
- 20 19. 根据权利要求 18 所述的光纤传感器, 其中所述孔和所述芯的纵轴位于包括所述椭圆玻璃管的长轴的第一平面内。
20. 根据权利要求 18 所述的光纤传感器, 其中
- 所述孔和所述芯的纵轴位于包括所述椭圆玻璃管的短轴的第一平
- 25 面内。
21. 一种光纤传感器, 包括
- a) 光纤芯, 具有至少沿着它的一部分形成的至少一个光栅;
- b) 包围所述芯的第一覆层;
- c) 用于加强所述芯中的双折射的双折射装置, 其中所述双折射装置
- 30 包括一对掩埋在所述第一覆层中的长形棒; 以及
- d) 压力响应装置, 用于把各向同性压力转换为作用在所述芯上的各向异性压力, 其中所述压力响应装置包括一对粘在所述第一覆层上

的毛细管。

22. 一种光纤传感器，包括

- a) 光纤芯，具有至少沿着它的一部分形成的至少一个光栅；
- b) 包围所述芯的第一覆层；
- 5 c) 用于加强所述芯中的双折射的双折射装置，其中所述双折射装置包括一对掩埋在所述第一覆层中的长形棒；以及
- d) 压力响应装置，用于把各向同性压力转换为作用在所述芯上的各向异性压力，其中所述压力响应装置包括注入到所述第一覆层的刻蚀或磨掉部分的压力敏感材料。

10 23. 用于测量压力或横向应变的光纤传感系统，包括

- a) 光源；
 - b) 光谱分析仪；以及
 - c) 光纤压力传感器，该传感器包括
 - i) 光纤芯，具有至少沿着它的一部分形成的至少一个光栅；
 - 15 ii) 包围所述芯的第一覆层；
 - iii) 用于加强所述芯中的双折射的双折射装置；以及
 - iv) 压力响应装置，用于把各向同性压力转换为作用在所述芯上的各向异性压力，其中
- 所述光源设置成把光传播到所述芯，所述光谱分析仪设置成检测从
- 20 所述芯中传出的光。

24. 根据权利要求 23 所述的光纤传感系统，还包括

- d) 分光器；以及
 - e) 低后反射终端，其中
- 所述芯具有第一端和第二端，
- 25 所述分光器位于所述光源和所述芯的所述第一端之间，
- 所述低后反射终端位于所述芯的所述第二端，以及
- 所述光谱分析仪相对于所述分光器设置成使得来自所述光源的光进入所述芯的所述第一端，而且至少所述光的一部分被所述至少一个光栅反射向后反射出所述芯的所述第一端，通过所述分光器进入
- 30 所述光谱分析仪。

25. 一种用于测量压力或横向应变的方法，包括

- a) 获得光纤光栅传感器，该传感器具有用于增强芯内的双折射的

双折射装置和用于把各向同性压力转换为作用在芯上的各向异性压力的压力响应装置;

- b) 把光纤光栅传感器光学耦合至光源;
- c) 把来自光源的光传播到光纤光栅传感器的芯内;
- 5 d) 把光谱分析仪光学耦合至光纤光栅传感器, 以及
- e) 测量光谱分析仪检测到的一个或多个光谱峰值的宽度, 以便确定光纤光栅传感器周围的压力或横向应变。

光纤压力传感器以及包括这种压力传感器的压力传感系统

5 本发明涉及光纤压力传感器。具体地说，本发明涉及分辨能力和动态范围增强的光纤压力传感器。

光纤传感器技术与光纤通信技术同时发展。使得光纤能够作为光波导的物理特性受环境例如温度、压力和应变的影响。可能认为光纤的这些特性对于通信技术是不利的，但是对于光纤传感器产业却是十分有利的。

10 光纤不管是用于通信还是环境传感器，通常包括圆柱芯、包围所述芯的同心圆柱覆层、以及包围所述覆层的同心圆柱保护套。所述芯由具有某一折射率的透明玻璃或者塑料制成。覆层也由透明玻璃或者塑料制成，但是具有不同的较小折射率。光纤作为可弯曲波导的能力主要是由芯和覆层的相对折射率决定的。

15 透明介质的折射率是真空中光速与介质中光速的比值。当光束进入介质时，速率的变化导致光束改变方向。具体地说，当光束从一种介质传播到另一种介质时，光束在两介质的分界面上改变方向。除了在两介质分界面上改变方向以外，一部分入射光在分界面上反射使得进入第二介质的光束能量减少（折射光束和反射光束的能量之和必须等于入射光束的能量）。如果已知两介质的折射率，可以利用斯涅耳定律预测反射角和折射角。

20 通过改变两种相邻介质的折射率，可以改变传播向两介质分界面的光束的折射角和反射角，使得进入第二介质的光强接近于零，几乎所有的光在分界面上反射。相反，对于任何两种透明介质，在它们的分界面上存在一个临界入射角，基本上所有以该入射角或比它小的入射角入射的光被反射。这一现象称为全内反射，用于选择光纤的芯和覆层的折射率，使得光在光纤的芯中传播时能量损失最小。

25 许多其它影响光在光纤的芯中传播的因素，包括芯和覆层的尺寸、光波长、光磁场矢量和光电场矢量。此外，许多用于确定光在波导（光纤）中理想传播的物理定律假设“理想”的波导，即理想对称、没有缺陷的平直波导。例如，芯的直径决定光纤是“单模”还是“多模”。术语单模和多模是指通过光纤传播的光束的空间取向。单模光

纤的芯直径相对小（2-12微米），而且只允许一种轴向传播模式。多模光纤的芯直径相对大（25-75微米），而且允许非轴向光束或模式通过芯传播。从有两个不同的光偏振状态可以通过芯传播的意义上说，所谓的单模光纤实际上是二模光纤。在理想直线型、没有缺陷的理想圆对称光纤中，光传播速率与偏振方向无关。

在具有椭圆芯的光纤中将具有两个优选传播方向（沿着长轴方向和短轴方向）。任何其它偏振方向的线偏振光入射到光纤中将以两个传播速率稍微不同的两种分离模式传播。这种类型的光纤称为具有“模双折射”。在实际的这种类型光纤中，由于芯-覆层分界面、折射率波动、以及其它机械性能不理想，即使理想偏振光也将耦合到其它模式中。可能沿着光纤的整个长度出现静态或动态偏振变化。在给定长度上，两个模式的相位将经过同相和异相的整个周期。该距离称为“拍长”。长的拍长与轻微双折射相关，而短拍长与严重双折射相关。双折射光纤也称为“偏振维持光纤”或“偏振保持（PM）光纤”。通过使得芯具有椭圆形截面，或者使得圆形芯的覆层向芯施加应力，可以实现双折射。例如，可以为覆层设置两个平行应力元件，两个应力元件的纵轴与芯的轴在同一平面内。

如上所述，光纤传感器利用环境影响可以改变沿着光纤传播的光的振幅、相位、频率、光谱成分、或偏振方向的事实。光纤传感器的主要优点包括它们的重量轻、尺寸小、无源、能量利用率高、结实、以及不受电磁干扰的影响。此外，光纤传感器具有非常高的灵敏度、大动态范围和宽波段潜力。而且，某些类型的光纤传感器可以沿着光纤长度方向分布或者复用。它们也可以掩埋在材料中。

现有光纤传感器的状态可以分为“非本征”或“本征”。非本征传感器依靠耦合到光纤上的一些其它装置以便把环境影响变换为沿着光纤传播的光的特性的变化。本征传感器依靠光纤的性能以便测量周围环境的影响。已知的光纤传感器包括线性位置传感器、转动位置传感器、液面传感器、温度传感器、应变传感器、光纤陀螺、以及压力传感器。

一种类型的光纤压力传感器利用如下事实，即环境压力使得光纤的套变形，套使得覆层变形，从而使得芯变形，改变光纤的双折射。授予 Hicks, Jr. 的美国专利 4,659,923 公开了一种能够测量压力的

光纤干涉型传感器。该装置通常包括单模光纤、光源、第一偏振片、第二偏振片、以及光强探测器。第一偏振片用于使得光源在与光纤的两个模式成 45° 的角度上偏振，然后光入射到光纤的一端。第二偏振片设置在光纤的另一端，使得从光纤出射的光在被光强探测器探测之前在与第一偏振片相同的角度上偏振。当在光纤的径向方向上加力时，光纤的双折射变化，该变化改变拍长，从而改变光强探测器探测的偏振光的强度。在另一实施例中，分光镜放置在光源与第一偏振片之间，而第二偏振片用耦合在光纤的第二端的反射镜代替。根据该另一实施例，探测器和光源可以位于光纤的同一端。没有提供关于所给出的传感器的灵敏度（分辨能力）和动态范围的数据。然而，提出压力对双折射的作用可能太小以致于不能测量相对小的压力。公开了各种安装光纤的结构，使得各向同性的力变换为各向不同的力，以便产生双折射和放大这种作用。专利 '923 提出了一种用于这一目的的结构，而且 Jansen 和 Dabkiewicz 在名称为 "High Pressure Fiber Optic Sensor with Side Hole Fiber" 的论文中公开得更详细，该论文发表在 "SPIE 学报，光纤传感器 II"，1987 年第 798 卷，第 56 - 60 页。侧孔光纤是这样一种光纤，即覆层具有两个贯穿光纤长度并平行于芯的平行孔。孔和芯的轴在同一平面内。这一结构导致把外部的流体静压转换为芯部的各向异性应力，从而产生双折射。Jansen 和 Dabkiewicz 证实传感器在压力范围 100-1,000 巴（10-100MPa, 1,450-14,500psi）内的精度为 $\pm 0.5\%$ ，而且上限为 2,000 巴，并不损害光纤。然而 100 巴以下双折射将变得难以探测或不存在。

双折射光纤压力传感器的问题之一是温度也影响芯的双折射。因此在某些温度和压力都变化的应用中，必须采取措施补偿温度对双折射的影响。授予 Farhadiroushan 的美国专利 5,515,495 公开了一种压力传感器，包括两个端-端融接在一起的侧孔光纤，使得每个光纤的纵轴彼此相对旋转 90° ，即一个光纤的侧孔和芯所在的平面与另一个光纤的侧孔和芯所在的平面垂直。一个光纤中的侧孔被密封，而另一个光纤中的侧孔敞开。光纤侧孔之一密封导致该光纤中的芯传感的压力与侧孔敞开的光纤中的芯传感的压力不同。通过两个接合光纤的光的组合相位延迟抵消掉温度对两个光纤的固有双折射的影响，如同 Dakin 和 Wade 在名称为 "Compensated Polarimetric Sensor Using

Polarization Maintaining Fiber in a Differential Configuration” 论文中所教导的那样，该论文发表在 Electron. Lett., vol 20, No. 1, pp51-53 (1984)。Farhadiroushan 没有公开关于所提出的光纤压力传感器的灵敏度或动态范围的数据。

- 5 另一种类型的光纤传感器利用芯内光纤光栅，如同授予 Udd 等的美国专利 5,380,995 中所公开的一样，该专利的完整说明书包括在这里以便参考。通过光纤掺杂诸如氧化锗 (germania) 材料然后把光纤的侧面暴露于干涉图样中以便使得芯的折射率呈正弦变化，在光纤中形成芯内布拉格光栅。目前两种已知的提供干涉图样的方法是通过全
10 息照相和通过相位掩膜光栅。全息照相利用两个短波激光光束（通常为 240nm），这两个光束通过光纤芯的侧面成象以便形成干涉图样。干涉图样的亮条纹使得芯的折射率被“调制”，从而形成光纤光栅。用短脉冲激光，利用相位掩膜一条线一条线地刻光纤光栅，可以获得类似的结果。通过调整干涉图样的条纹间距，可以按希望改变周期性
15 折射率。实际改变折射率的过程并不是很清楚，但是该过程关系到产生不同类型的光纤，这些光纤在光栅损坏之前能够工作在高达 500-800℃ 温度范围内。

环境温度和应力的影响使得光纤伸长或缩短，这样改变光栅的周期，因而改变光纤光栅透射光或反射光的光谱成分。特别是，对于温
20 度变化 ΔT 和应变 ϵ ，百分比布拉格波长漂移由下面的式 1 给出，其中 α 是光纤的热膨胀系数， ξ 表示掺杂二氧化硅的芯材料的热光系数或 (dn/dT) ，而 P_e 是光弹性常数。

$$\frac{\Delta\lambda_g}{\lambda_g} = (\alpha + \xi)\Delta T + (1 - P_e)\epsilon \quad (1)$$

对于温度，主要影响是折射率变化，大约是膨胀系数的影响的十
25 五倍。如同 W. W Morey 在论文中所述一样，光纤光栅的温度响应随着光纤类型而变化，但是发现直到 500℃ 时响应是线性的。所述论文名称 “Distributed Fiber grating Sensors”，发表在 Proceedings of the Seventh Optical Fiber Sensors Conference, pp285-288, Sydney, Australia, December 1990。对于 Andrew PM 光纤在 833nm
30 典型温度响应是 0.0043nm/℃，对于 Corning FlexCore Fiber 在 824nm 是 0.0074nm/℃。当光纤光栅变形时，布拉格波长变化光弹性

地导致折射率变化。对于二氧化硅，光弹性常数是 0.22。在测得应力为 45 千 psi 的拉伸状态下，对于在 820nm 时变化率为每微应变 5.2×10^{-4} nm，那么布拉格波长变化是产生 2.3nm 的漂移。Morey 还描述了怎样可以把从沿着光纤长度上分布的多个光栅反射的光多路传输，以便在单个光路中提供多个空间分离的传感器。

授予 Udd 等的美国专利 5,380,995 教导了使用远距离光栅和本地光栅，设置所述远距离光栅目的是传感环境影响，例如应变或者温度；设置所述本地光栅目的是不受环境影响。比较两个光栅的光谱包络，从而能够分离出应变和温度对远距离光栅的影响。’995 光栅还教导使用两个重叠的波长不同的光栅，例如 1.3 和 1.5 微米，以便在同一点上测量两个环境影响例如应变和温度。

授予 Udd 的美国专利 5,591,965 还教导了另一种将应变和温度影响分开的方法，该专利的整个说明书全部包括在这里以便参考。’65 专利教导使用一对基本上刻在双折射光纤的同一位置上的光栅。当双折射光纤具有光栅时，产生两个光谱峰值（每个对应于一个偏振轴），而且温度和纵向应变变化影响峰值之间的分离程度以及峰值的波长漂移。如同’65 专利所教导的一样，具有两个光谱分离的光栅的双折射光纤产生四个光谱输出（峰值）。光谱探测器例如耦合到光纤上的 Fabry-Perot 标准器检测出四个光谱输出。分析光谱输出并解四个方程以便确定温度和应变二者对光纤的影响。

虽然’995 专利和’65 专利都没有具体提及压力传感器，但是已经证实超高流体静压导致光纤物理长度相对变化，从而导致包括在光纤芯中的光栅的布拉格波长相对变化。例如，M. G. Xu 等在“Optical In-Fibre Grating High Pressure Sensor, Electron. Lett. Vol. 29, No. 4, pp. 398-399 (1993) 中说明，可以怎样将光纤布拉格光栅传感器用于测量非常高的压力。特别是，Xu 等说明了简单的光纤内光栅传感器，该传感器的线性布拉格波长漂移为 3.04×10^{-3} mm/MPa。Xu 等没有直接公开该传感器的动态范围和灵敏度。作者特别指出他们的传感器要更为有用，就需要更多补偿温度的影响，而且指出他们的传感器的实际优点只是在超高压下明显。

通过上面的描述，本领域的技术人员将发现光纤传感器的灵敏度和动态范围受许多参数影响。

因此，本发明的目的是提供一种光纤压力传感器和压力传感系统。

本发明的另一目的是提供一种光纤压力传感器，当用于压力传感系统时该传感器具有高分辨率和宽动态范围。

5 本发明的再一个目的是提供一种包括光栅光纤的光纤压力传感器。

本发明的再一个目的是提供一种光纤压力传感器，该传感器包括具有高分辨率和宽动态范围的光纤光栅。

10 本发明的再一个目的是提供一种具有固有温度补偿能力的光纤压力传感器。

本发明的另一个目的是提供一种对横向应变响应增强的光纤压力传感器。

本发明的另一个目的是提供一种结实而且便宜的光纤压力传感器。

15 根据这些在下面将详细描述的目的，本发明的光纤压力传感器包括上面刻有一个或多个光栅的光纤芯，用于增强芯的双折射的结构，以及用于把各向同性的压力变换为光纤芯上的各向异性压力的结构。根据本发明的光纤压力传感器最好与光源（例如 LED、激光器、或者激光二极管）和光谱解调系统一起使用，以便检测光纤压力传感器周围的压力。

20 根据本发明的第一实施例，所述芯具有作为增强双折射结构的第一椭圆形覆层，设置在第一覆层之上的第二圆形覆层。第二覆层具有一对纵向孔，所述纵向孔提供把各向同性压力变换为光纤芯上的各向异性压力的结构。所述孔设置成使得它们的纵轴与所述芯的纵轴位于同一平面内。椭圆形覆层可以设置成它的长轴或短轴与所述孔和所述芯的轴在同一平面内。

25 根据第二实施例，所述芯具有圆形覆层，该圆形覆层包括一对纵向孔以及一对双折射发生棒。所述孔设置成使得它们的纵轴位于还包括芯的纵轴的第一平面内。所述棒设置成使得它们的纵轴位于还包括芯的纵轴的第二平面内。所述孔和棒最好设置成使得第二平面与第一平面彼此相交成直角。

30 根据第三实施例，覆层中的纵向孔形成为 V 形截面或 C 形截面。

根据第四实施例，PM（偏振保持）光纤具有非对称侧孔。

根据第五实施例，把传统双折射光栅光纤放置在具有一对密封纵向孔的毛细管中。

5 根据第六实施例，特大覆层设置在单模光纤上。覆层具有特大空气孔和压力元件。空气孔被密封而且光纤被切成标准尺寸的单模光纤。

根据第七实施例，具有椭圆形芯覆层的非对称侧孔光纤掩埋在硬衬底材料，它的部分表面暴露，而且压力隔板安装在暴露表面上。

10 根据第八实施例，具有侧孔的单模光纤掩埋在硬衬底材料中，它的部分表面暴露，而且压力隔板安装在暴露表面上。利用在光纤芯中产生双折射的机械装置使得硬衬底材料受压。

根据第九实施例，侧孔光纤卷入软玻璃（低熔点）中，它的部分表面暴露在外面。

15 根据第十实施例，侧孔光纤安装在底座与杠杆臂之间。杠杆臂作为在光纤芯中产生双折射的压力放大器。

根据第十一实施例，侧孔光纤放置在圆柱玻璃管中，然后压平圆柱玻璃管成为椭圆形截面，使得芯变形并产生双折射。

根据第十二实施例，一对封口毛细管粘合在单模光纤或PM光纤的侧面。

20 根据第十三实施例，PM光纤的部分覆层被磨掉或刻蚀掉，并用压力敏感材料代替。

25 根据本发明的光纤压力传感器可以切成光纤片使得压力传感器可以放置成远离传感系统的其他部件。此外，根据本发明的几个压力传感器可以重叠或切成光纤片使得多个压力传感位置可以复用在单个光纤波导中。

根据本发明的光纤压力传感器可以用于地震或声学应用中用于单点或多点传感压力，或者用于需要宽动态范围和高分辨率的其他应用中。

30 本领域的技术人员还应该理解当适当膜层加在传感器上将提高对多点传感的电场或磁场的光栅响应。

参考下面结合附图的详细描述，本发明的其他目的和优点对本领域的技术人员将变得更明显。

- 图 1 是根据本发明的光纤压力传感系统的示意图；
- 图 2 是从非 PM 光纤中的单个布拉格光栅反射的光的光谱成分曲线；
- 图 3 是流体静压对从单个布拉格光栅反射的波长的影响的曲线
- 5 图；
- 图 4 是温度对从单个布拉格光栅反射的波长的影响的曲线图；
- 图 5 是从双折射光纤中的单个布拉格光栅反射的光的光谱成分曲线；
- 图 6 是从侧孔光纤中的单个布拉格光栅反射的光的光谱成分的平均波长和峰值之间分离的变化的曲线；
- 10 图 7a-7d 是不同流体静压下从侧孔光纤中的单个布拉格光栅反射的光的光谱成分曲线；
- 图 8 是表示从三种不同类型光纤的单个布拉格光栅反射的光波长绝对变化的曲线图；
- 15 图 9 是根据本发明的光纤压力传感器第一实施例的横截面示意图；
- 图 10 是根据本发明的光纤压力传感器的另一第一实施例的横截面示意图；
- 图 11 是根据本发明的光纤压力传感器第二实施例的横截面示意图；
- 20 图 12 是根据本发明的光纤压力传感器第三实施例的横截面示意图；
- 图 13 是根据本发明的光纤压力传感器的另一第三实施例的横截面示意图；
- 25 图 14 是根据本发明的光纤压力传感器第四实施例的横截面示意图；
- 图 15 是根据本发明的光纤压力传感器第五实施例的示意图；
- 图 16 是根据本发明的光纤压力传感器第六实施例的示意图；
- 图 17 是根据本发明的光纤压力传感器第七实施例的横截面示意图；
- 30 图 18 是根据本发明的光纤压力传感器第八实施例的横截面示意图；

图 19 是根据本发明的光纤压力传感器第九实施例的横截面示意图；

图 20 是根据本发明的光纤压力传感器第十实施例的横截面示意图；

5 图 21 是根据本发明的光纤压力传感器第十一实施例的横截面示意图；

图 22 是根据本发明的光纤压力传感器的另一第十一实施例的横截面示意图；

图 23 是根据本发明的光纤压力传感器第十二实施例的示意图；

10 图 24 是根据本发明的光纤压力传感器的另一第十三实施例的纵截面示意图；以及

图 25 是根据本发明的光纤压力传感器的另一第十三实施例的横截面示意图。

现在参考图 1，根据本发明的示范性光纤压力传感系统 10 通常包
15 括光源 12、光谱分析仪 14、光纤分光器 16、低后反射终端 20、以及一个或多个双折射光纤压力传感器 22（22'等），每个传感器具有一个或多个光栅 24、26（24'、26'等）。光源 12 可以是例如 LED、可调激光器、或激光二极管。最好使用相对宽谱段的光源，这样将允许使用多个不同波长的光栅。光谱分析仪 14 可以是 Fabry-Perot 标准器
20 或者其他已知类型的装置。后反射终端 20 可以是授予 Udd 等的美国专利 4,834,493 中公开的类型。传感器的数目和每个传感器中光栅的数目并不是严格的，只要至少有一个传感器，该传感器具有一个光栅。

根据本发明，光纤压力传感器 22 还具有新型结构，如同下面将结
25 合其他附图详细描述的一样，该结构提高了的灵敏度和动态范围。传感系统 10 的元件排列基本上如图 1 所示。光源 12 发射光束通过分光器 16 使得光进入光纤压力传感器 22 的一端。部分光谱被光栅 24(26) 后反射到分光器 16，分光器 16 把反射光束传播至光谱分析仪 14。根据设置在光纤中的不同光栅 24（26）的数目，光谱分析仪将检测一对
30 或多对光谱峰值。峰值波长以及它们的彼此相对漂移将根据施加在光纤压力传感器 22 上的压力而变化。

本发明部分根据发明人对在经受流体静压的传统光栅光纤中所观

察到的光谱漂移进行实验所得的结果。用于实验的典型光栅的 FWHM 线宽为 0.2nm，而且大约为峰值反射率的 50%。图 2 示出当使用宽波段 1.3 微米的光源照明时这种光栅的反射光谱。根据上面给出的式 1，希望峰值波长随着高达 500℃ 的温度和 45KPsi 的压力而线性漂
5 移。图 3 和 4 示出了被布拉格光栅反射的光峰值波长是怎样随着压力和温度变化的。

下一个实验是关于刻在 1.55 微米波长区域的 PM 光纤上的光栅。如同所希望的一样，PM 光纤的双折射使得光栅沿着两个折射率不同的垂直轴向回反射光，以便在反射光的光谱中出现两个不同的峰值。图
10 5 示出从 PM 光纤的单个布拉格光栅反射的光谱成分。

对三种不同类型的 PM 光纤进一步进行实验，发现在单个光栅 PM 光纤中流体静压的影响导致光谱峰值之间的距离增大，而且峰值平均波长移向较短波长。此外，发现两个峰值平均波长的变化比峰值之间距离的变化大得多，达大约 5 倍。用于实验中的 PM 光纤是基于应力
15 棒的光纤，其中光纤覆层具有一对在芯中产生双折射的纵向应力发生棒。还利用具有椭圆形芯和圆柱覆层的 PM 光纤进行实验，产生相同结果。利用基于棒的 PM 光纤进行其他实验，该光纤制成没有棒，以便形成具有两个注入空气的侧孔的光纤。对于这种类型的光纤发现峰值平均波长变化比峰值之间的距离变化小得多，大约 4.5 倍。对于改
20 进的 Corning SH4 光纤的这些结果示于图 6 中，其中陡峭曲线是峰值之间距离的变化，平坦曲线是峰值平均波长的变化。然而，还发现利用进行实验时可以买到的解调装置，侧孔光纤在 3,000psi 以下不提供两个可辨别的光谱峰值。

图 7a-7d 分别描述了置于 8psi、2900psi、5879psi、以及 9876psi
25 的流体静压下的侧孔光纤中的单个布拉格光栅反射光的光谱。通过这些图可以看到在小于或等于 2900psi 的压力下，反射光的光谱成分不表现为两个不同的峰值。利用 Ando Optical Spectrum Analyzer 和 Queengate Fabry-Perot 光纤标准解调器进行实验。虽然较高分辨率的解调器可能能够探测两个不同的峰值，但是实验和本发明的目的是
30 寻找一种提高光纤压力传感器的分辨率和动态范围的方法，同时利用容易使用的解调技术。尽管如此，注意到随着压力朝着导致可探测的双折射的点增加，单个峰值的宽度增加。因此，在不存在两个不同波

长时通过测量单个峰值的宽度（加宽或变窄），也可以提供精确的测量。

获得在三种不同类型光纤中波长漂移的绝对值与压力关系的比较结果，每种类型的光纤具有相同波长的单个布拉格光栅。图 8 示出标准 SMF-28 光纤、PM 类型光纤、以及非 PM 侧孔光纤的实验结果。从斜率（波长漂移 nm/psi）增大可以看到，PM 光纤比具有同种类型布拉格光栅的标准光纤的响应高（分辨率或灵敏度）。而且，侧孔光纤的响应比具有同种类型布拉格光栅的 PM 光纤的响应高得多。从这些实验结果得出如下结论，即在测量压力方面侧孔光纤的分辨率较高，而且具有光栅的标准单模光纤表现出的动态范围比侧孔光纤好（小至 0 psi），但是因为必须使用单个光谱峰值进行测量，所以只能提供比较粗糙的压力分辨率。

现在参考图 9 和 10，根据本发明的光纤压力传感器第一实施例 122 包括具有一个或多个光栅（未示出）的芯 123。该芯被产生双折射的第一椭圆形覆层 126 包围。第一覆层 126 被第二圆柱覆层 128 包围，第二圆柱覆层 128 具有两个纵向圆柱侧孔 130、132，把各向同性压力转换为各向异性压力。根据图 9 所示实施例，芯 123、第一覆层 126、第二覆层 128、以及侧孔 130、132 设置成与它们的纵轴在同一平面内，而且与第一覆层 126 的短轴在同一平面内。图 10 中所示另一第一实施例 122a 与实施例 122 基本相同，类似的参考标号表示类似的部件，但是第一覆层 126a 的长轴位于同一平面内。当用于压力传感系统中时，例如图 1 所示的系统中，光纤 122、122a 表现出的分辨率和动态范围提高了。特别是，光纤 122、122a 能够提供好的压力分辨率，动态范围为 0 psi 至至少 10 kpsi。

现在参考图 11，根据本发明的光纤压力传感器第二实施例 222 包括具有一个或多个光栅（未示出）的芯 223。该芯 223 具有覆层 228，覆层 228 具有一对双折射发生棒 226、226' 以及一对纵向圆柱侧孔 230、232，把各向同性压力转换为各向异性压力。如图 11 所示，芯 223、覆层 228、以及应力发生棒 226、226' 设置成它们的纵轴在同一个第一平面内；而芯 223、覆层 228、以及纵向侧孔 230、232 的纵轴位于与第一平面垂直的第二平面内。当用于如图 1 所示的压力传感系统时，光纤压力传感器 222 表现出增强的分辨率和动态范围。

现在参考图 12, 光纤压力传感器的第三实施例 322 与第二实施例 222 类似, 类似的参考标号表示类似的部件。然而, 根据该实施例, 侧孔 330、332 不是圆柱形, 而是具有 C 形截面, 把各向同性的力转换为集中在芯 323 上的各向异性的力。在图 13 所示的另一第三实施例 322a 与实施例 322 类似, 类似的参考标号表示类似的部件。根据该实施例, 侧孔 330a、332a 具有 V 性截面, 把各向同性的力转换为集中在芯 323a 上的各向异性的力。当用于如图 1 所示的压力传感系统中时, 光纤压力传感器 322、322a 的分辨率和动态范围提高了。

图 14 示出的光纤压力传感器第四实施例 422 与第二实施例 222 类似, 类似的参考标号表示类似部件。然而根据该实施例, 侧孔 430、432 的尺寸和位置是非对称的。特别是, 侧孔 432 的截面直径小于侧孔 430 的截面直径。此外, 侧孔 432 的纵轴不与侧孔 430 和芯 423 共面。当用于如图 1 所示的压力传感系统中时, 光纤压力传感器 422 的分辨率和动态范围提高了。

现在参考图 15, 根据本发明的光纤压力传感器第五实施例 522 包括具有芯 523 的 PM 光纤 521, 芯 523 设置有一个或多个光栅 524 和一对应力发生棒 (未示出)。把 PM 光纤 521 插入毛细管 525 中, 毛细管 525 具有两个纵向圆柱形侧孔 530、532, 把各向同性的力转换为各向异性的力。侧孔的端部堵上环氧树脂 531a、531b、533a、533b 或以其他适当的方式密封。当用于如图 1 所示的压力传感系统中时, 光纤压力传感器 522 的分辨率和动态范围提高了。

光纤压力传感器第六实施例 622 示于图 16 中。根据该实施例, PM 光纤 621 的芯 623 上刻有一个或多个光栅 624, PM 光纤 621 具有大尺寸覆层 628, 覆层 628 具有大尺寸侧孔 630、632。通过把光纤 621 切成具有相同的大尺寸直径的两根单模光纤 640、642, 以便密封侧孔。然后把单模光纤的端部切成通讯级光纤 644、646。当用于如图 1 所示的压力传感系统中时, 光纤压力传感器 622 的分辨率和动态范围提高了。

现在参考图 17, 光纤压力传感器第七实施例 722 包括具有带一个或多个光栅 (未示出) 的芯 723 的 PM 光纤 721、包围芯的第一椭圆形覆层 726、以及包围第一覆层的第二覆层 728。第二覆层具有非对称的侧孔 730、732 并安装在硬衬底材料 750 中, 它的部分表面暴露在

外面。柔性隔板 752 安装在衬底材料 750 上并覆盖覆层 728 的暴露部分。施加在隔板 752 上的压力变换为芯 723 中的横向应变。当用于如图 1 所示的压力传感系统中时，光纤压力传感器 722 的分辨率和动态范围提高了。

5 图 18 示出光纤压力传感器第八实施例 822，包括带一个或多个光栅（未示出）的芯 823 的单模光纤 821 以及具有一对侧孔 830、832 的覆层 828。覆层 828 安装在硬衬底材料 850 中，它的部分表面暴露在外面。柔性隔板 852 安装在衬底材料 850 上并覆盖覆层 828 的暴露部分。衬底材料 850 安装在机械装置 854 中（诸如夹具或虎钳），机械装置 854 在衬底材料 850、覆层 828、以及芯 823 中产生压力，以便在芯中产生双折射。施加在隔板 852 上的压力变换为芯 823 中的横向应变。当用于如图 1 所示的压力传感系统中时，光纤压力传感器 822 的分辨率和动态范围提高了。

15 现在参考图 19，光纤压力传感器第九实施例 922 包括带一个或多个光栅（未示出）的芯 923 的单模光纤 921 以及具有一对侧孔 930、932 的覆层 928。覆层 928 卷入一块熔点相对覆层低的玻璃 950 中，暴露覆层的部分表面。玻璃作为在芯 923 中产生双折射的应力发生元件。施加在覆层暴露表面上的压力变换为芯 923 中的横向应变。隔板（未示出）可以安装在玻璃上覆盖覆层的暴露表面。当用于如图 1 所示的压力传感系统中时，光纤压力传感器 922 的分辨率和动态范围提高了。

25 图 20 示出光纤压力传感器第十实施例 1022，包括带一个或多个光栅（未示出）的芯 1023 的单模光纤 1021 以及具有一对侧孔 1030、1032 的覆层 1028。覆层 1028 支撑在硬衬底材料 1050 上，使得具有 V 形槽 1051 和杠杆臂 1052 的板安装在覆层 1028 的上方。施加在杠杆臂 1052 左右端上的压力变换为芯 1023 中的横向应变。当用于如图 1 所示的压力传感系统中时，光纤压力传感器 1022 的分辨率和动态范围提高了。

30 现在参考图 21，光纤压力传感器第十一实施例 1122 包括带一个或多个光栅（未示出）的芯 1123 的单模光纤 1121 以及具有一对侧孔 1130、1132 的覆层 1128。覆层 1128 插入熔点相对覆层低的玻璃毛细管套 1150 中。加热玻璃 1150 并卷成椭圆形玻璃外鞘。玻璃鞘作为在

芯 1123 中产生双折射的应变发生元件，所述芯假设呈椭圆形横截面。在加热并卷完玻璃外鞘之后侧孔 1130、1132 也呈椭圆形横截面。施加在鞘 1150 上的压力变换为芯 1123 中的横向应变。如图 21 所示，鞘 1150 形成为使得它的椭圆横截面长轴位于包括芯 1123 和侧孔 1130、1132 的纵轴的另一平面内。另一第十一实施例 1122a 示于图 22 中，其中类似的参考标号表示类似的部件。如图 22 所示，鞘 1150a 形成为使得它的椭圆横截面短轴位于包括芯 1123a 和侧孔 1130a、1132a 的纵轴的另一平面内。当用于如图 1 所示的压力传感系统中时，光纤压力传感器 1122 和 1122a 的分辨率和动态范围提高了。

图 23 示出光纤压力传感器第十二实施例 1222，包括带一个或多个光栅（未示出）芯 1223 的 PM 光纤 1221，和具有一对纵向应力发生棒 1126、1126' 的覆层 1228。一对毛细管 1260、1262 每个都具有端盖 1260a、1260b、1262a、1262b，粘在覆层 228 的侧面。当用于如图 1 所示的压力传感系统中时，光纤压力传感器 1222 的分辨率和动态范围提高了。

现在参考图 24 和 25，光纤压力传感器第十三实施例 1322 包括带一个或多个光栅 1324 的芯 1323 的 PM 光纤 1321 以及具有一对纵向应力发生棒 1326、1326' 的覆层 1328。覆层 1328 的两部分 1331、1333 被磨掉或刻蚀掉并注入压力敏感材料 1330、1332，即比覆层对压力更为敏感的材料例如尼龙。施加在材料 1330、1332 的压力变换为芯 1323 中的横向应变。当用于如图 1 所示的压力传感系统中时，光纤压力传感器 1322 的分辨率和动态范围提高了。

这里已经描述和说明了分辨率和动态范围增强的光纤压力传感器和利用这种传感器的光纤压力传感系统的几个实施例。虽然描述了本发明的特定实施例，但是本发明并不限于此，本发明的范围意欲如同技术所允许的一样宽，说明书的意思也是如此。例如，公开的压力传感系统只是利用光纤压力传感器的示范系统。本领域的技术人员将理解本发明的光纤压力传感器也可以很好地应用在其他类型的压力传感系统中。此外，将理解可以在单个光波导中应用多个光栅以便通过单个波导测量不同位置的应力。本领域的技术人员将进一步理解根据本发明的小光纤压力传感器可以切成通讯光纤并放置在相对远离光谱分析仪的探测点上。因此，本领域的技术人员可以理解能够对本发明进行其他改进，而不脱离本发明权利要求的精神和范围。

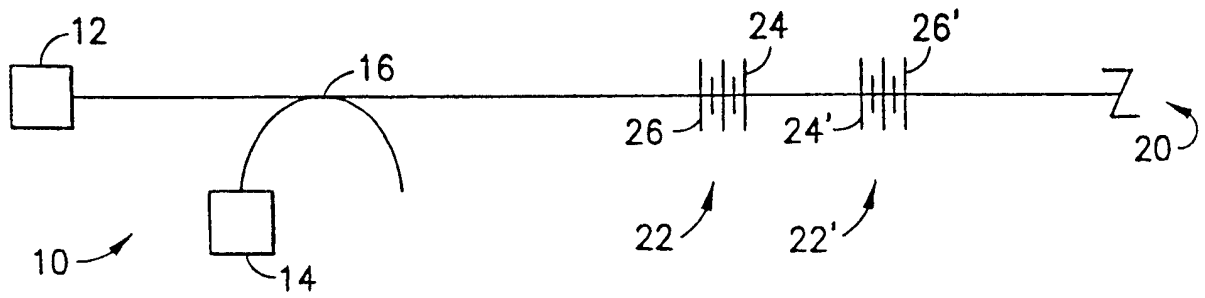


图 1

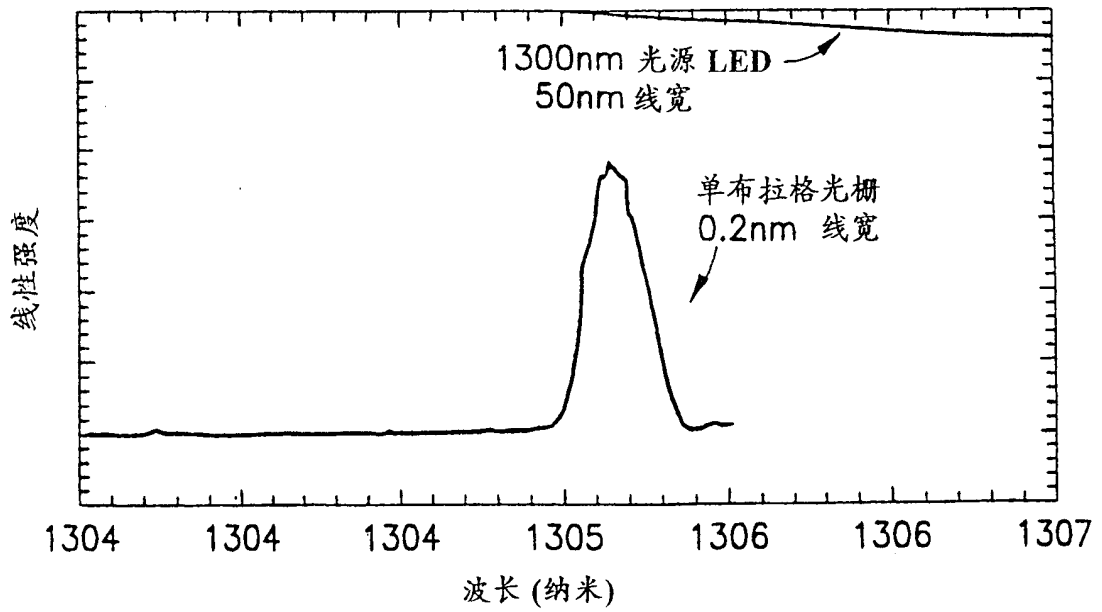


图 2

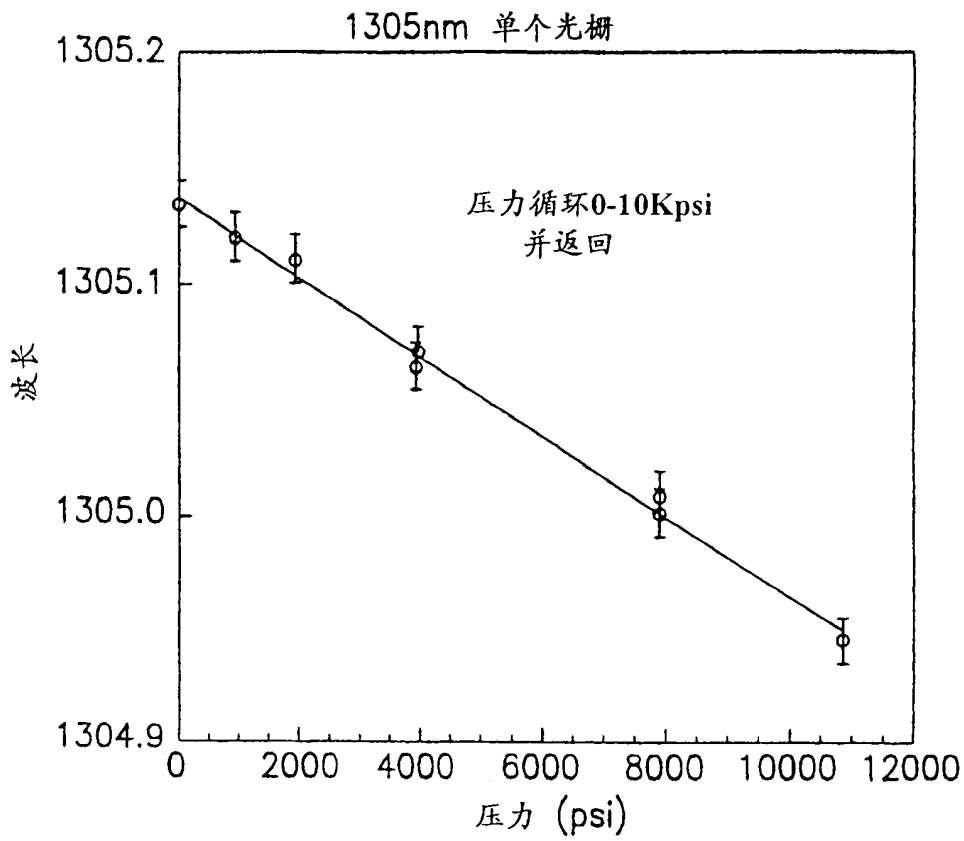


图 3

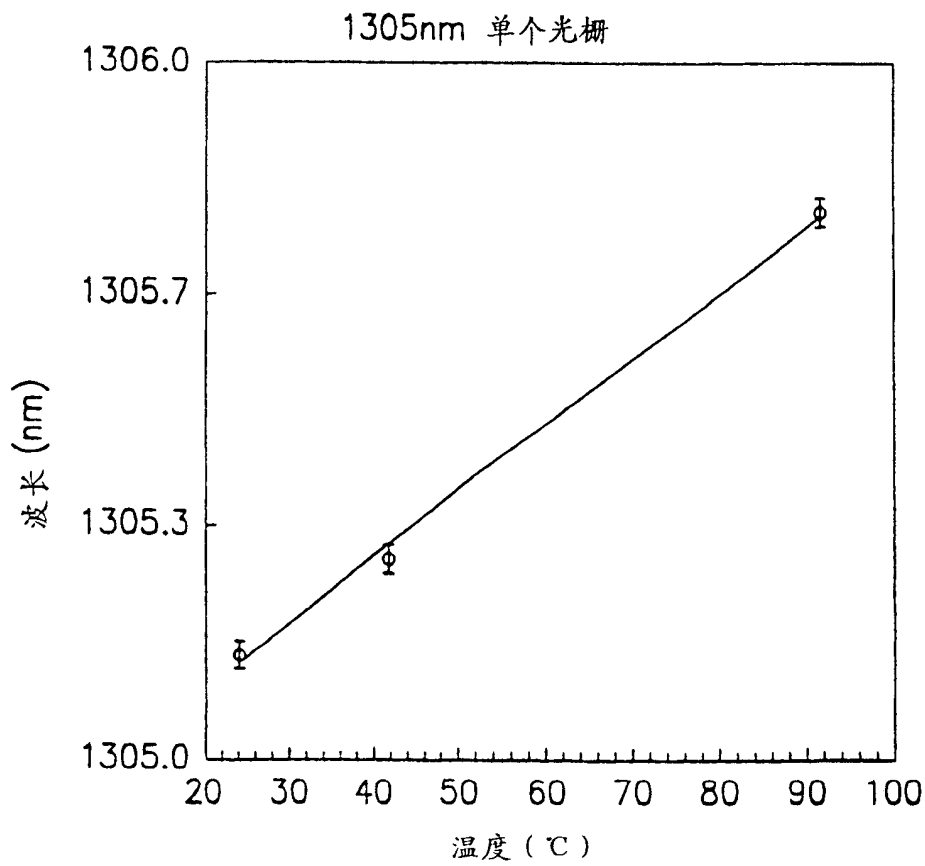


图 4

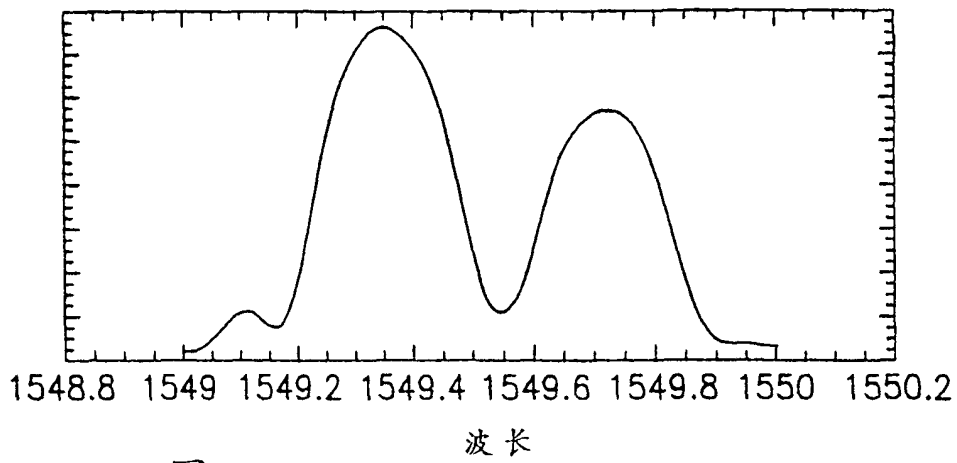


图 5

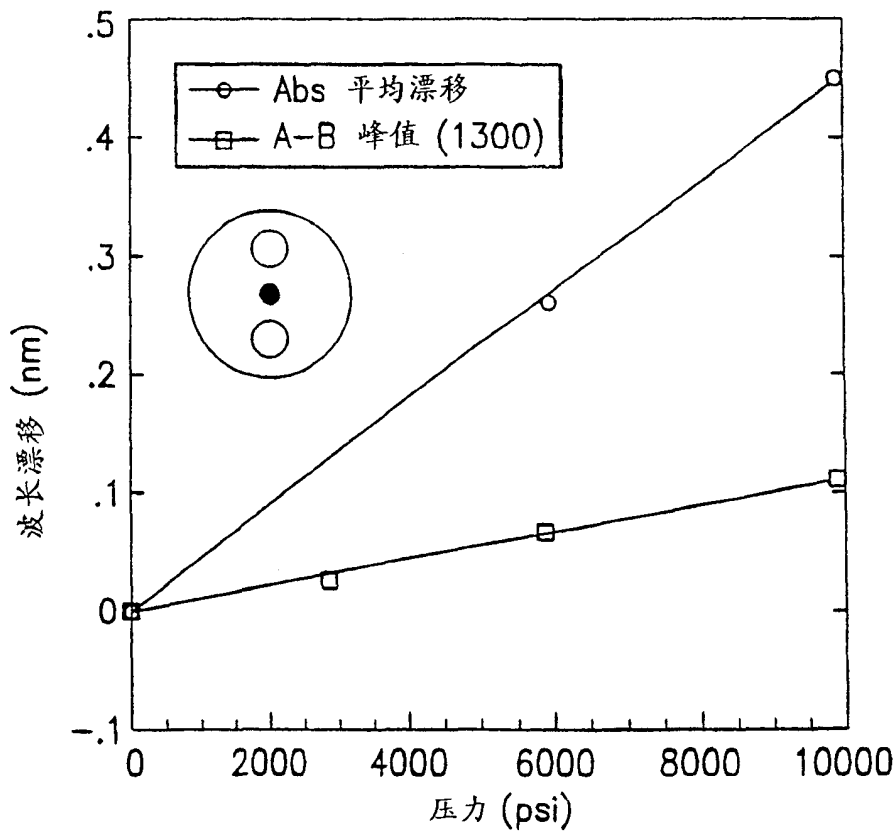


图 6

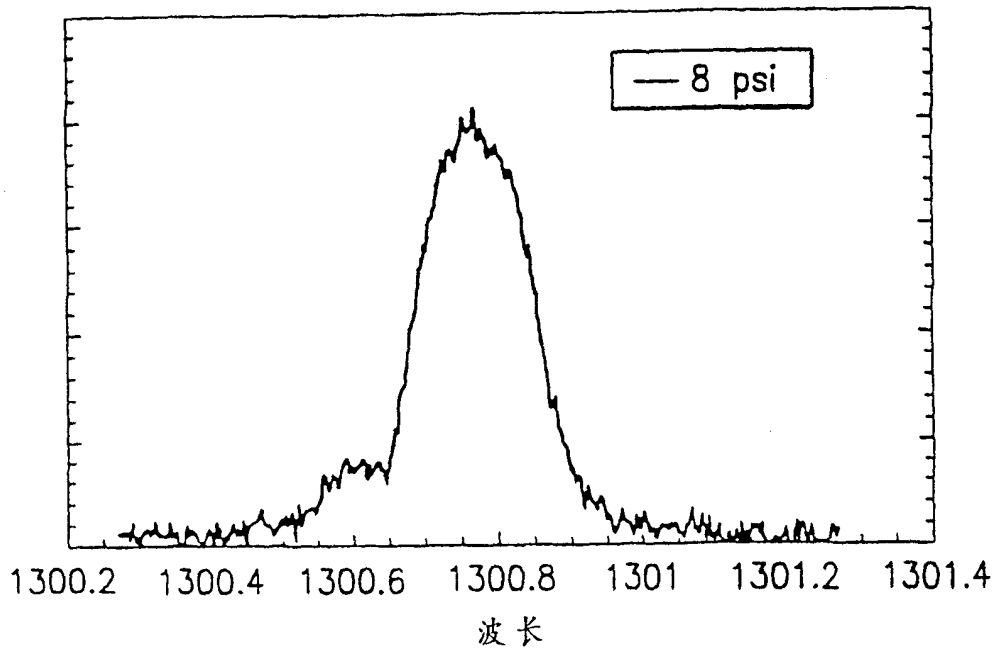


图 7a

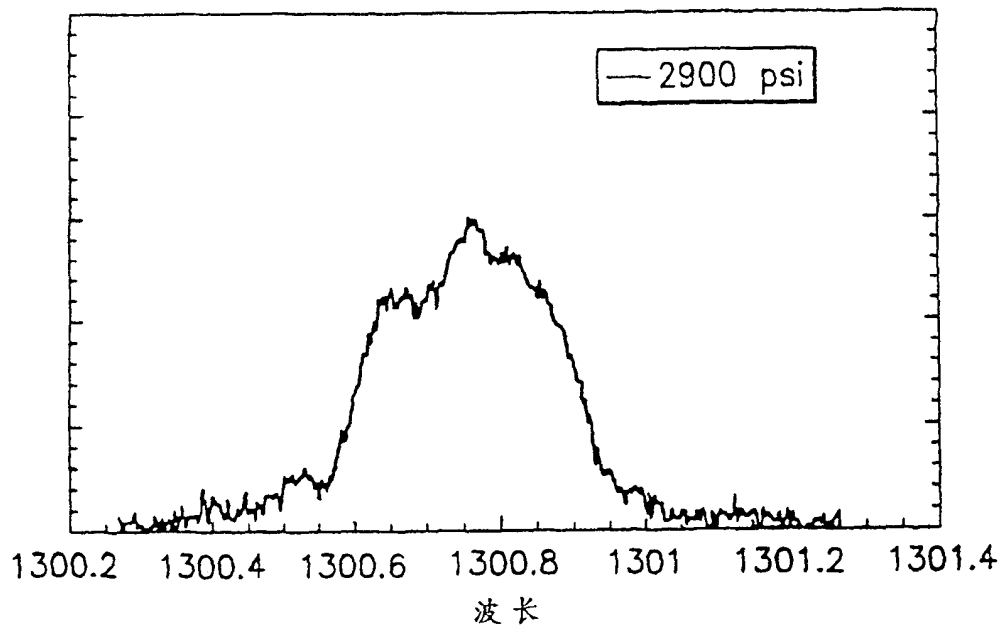


图 7b

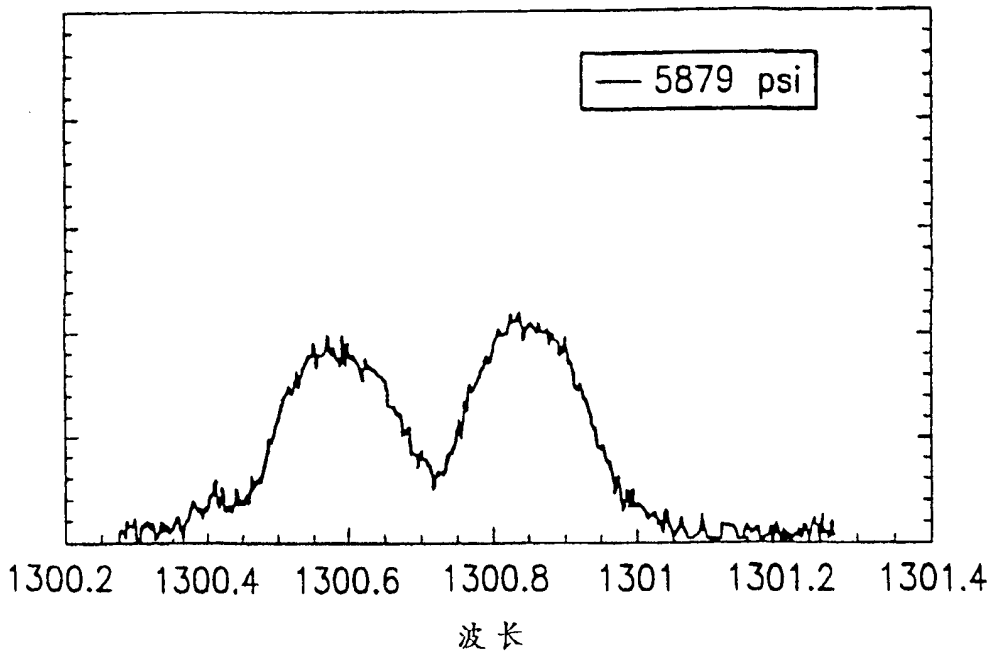


图 7c

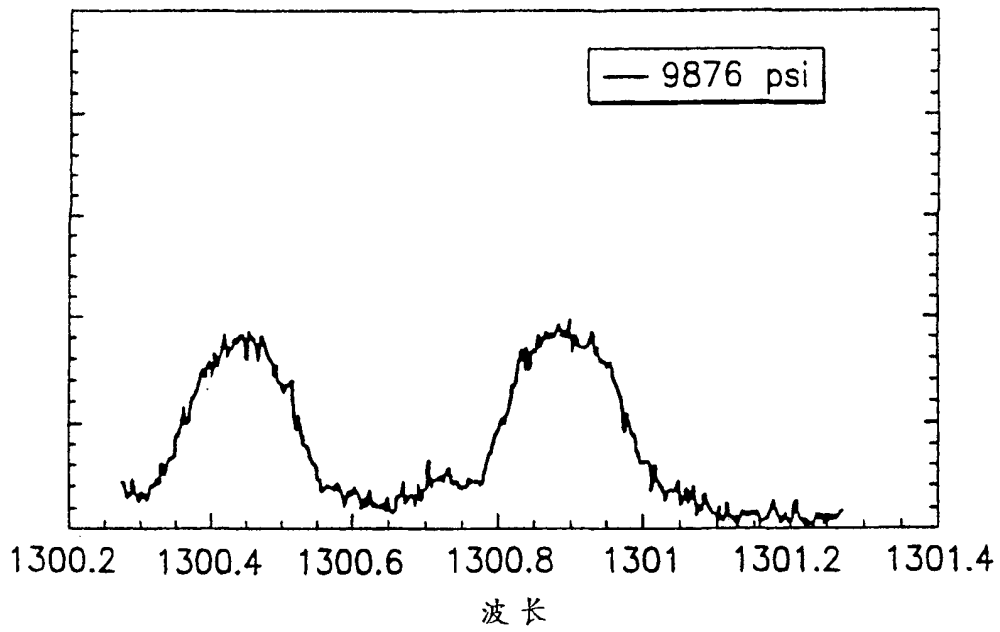


图 7d

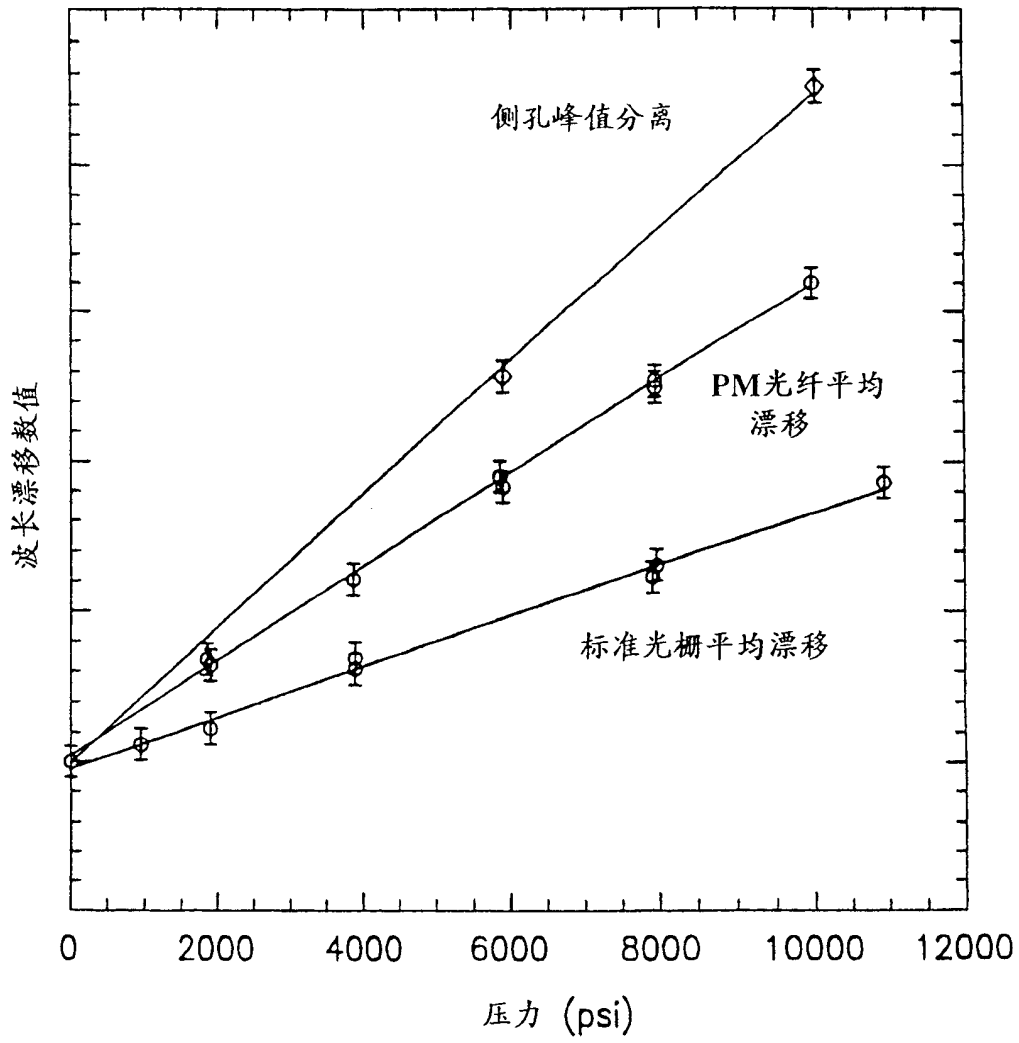


图 8

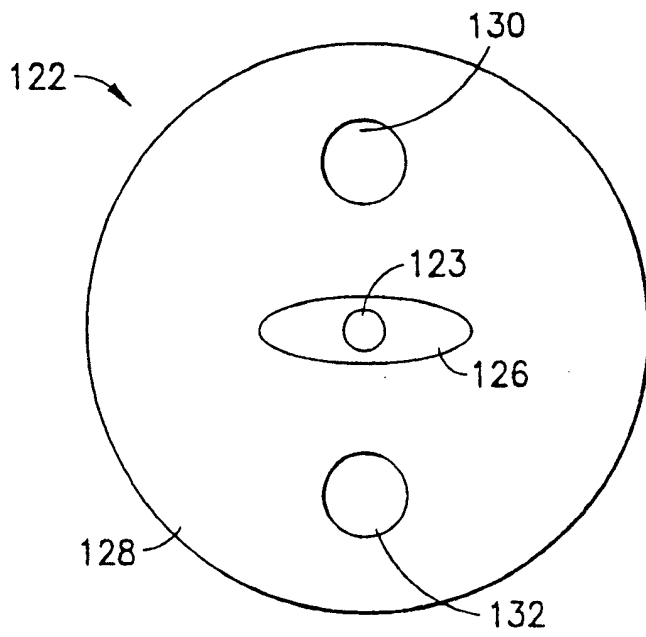


图 9

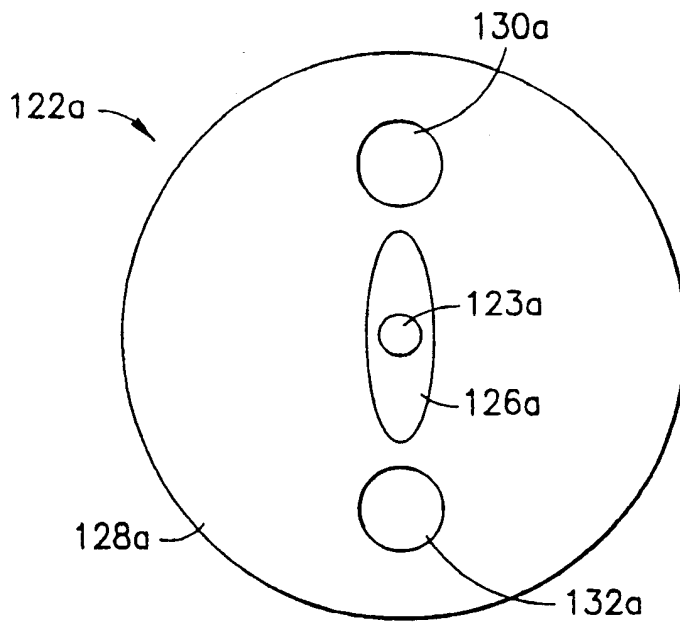


图 10

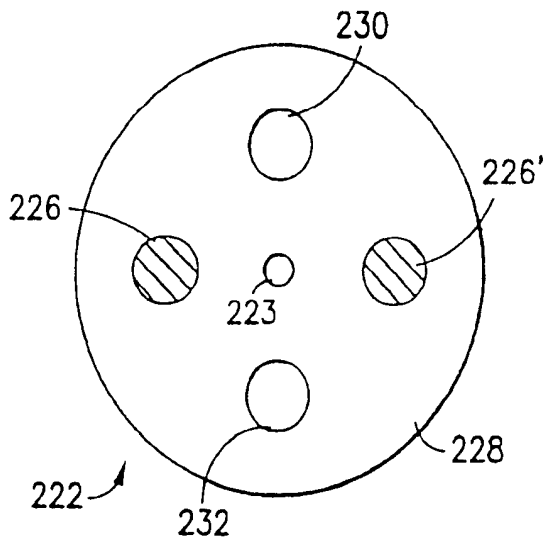


图 11

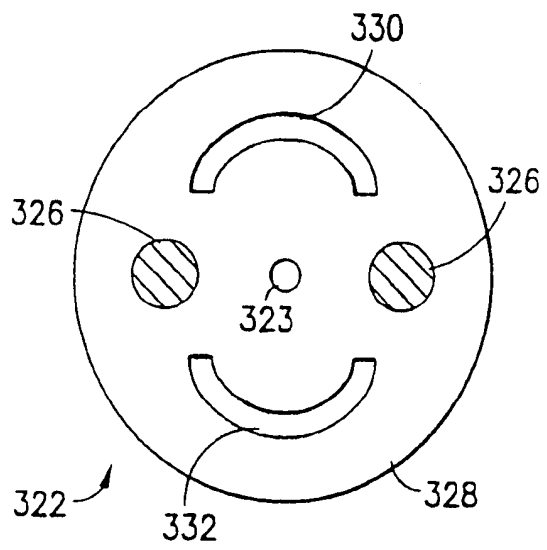


图 12

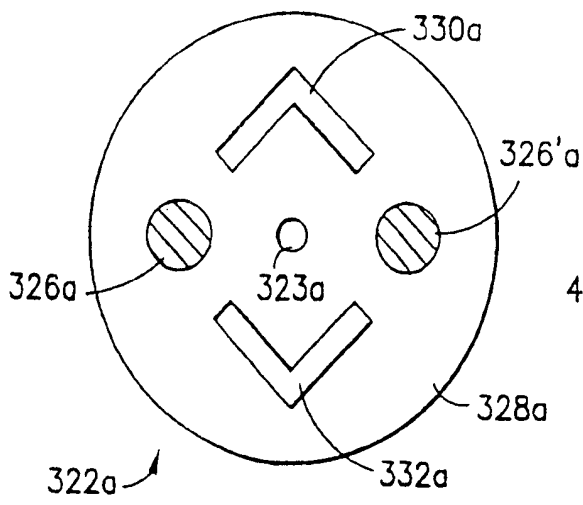


图 13

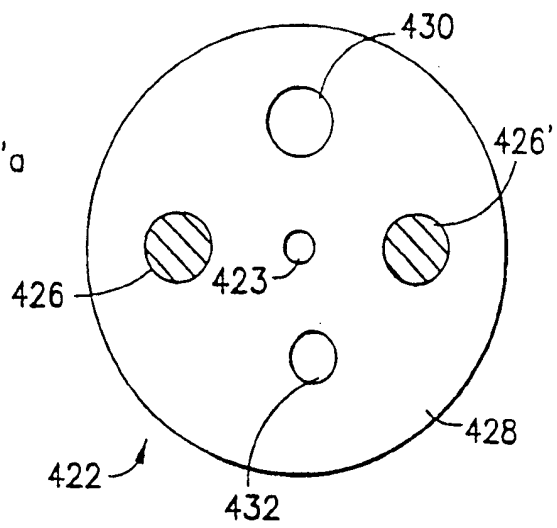


图 14

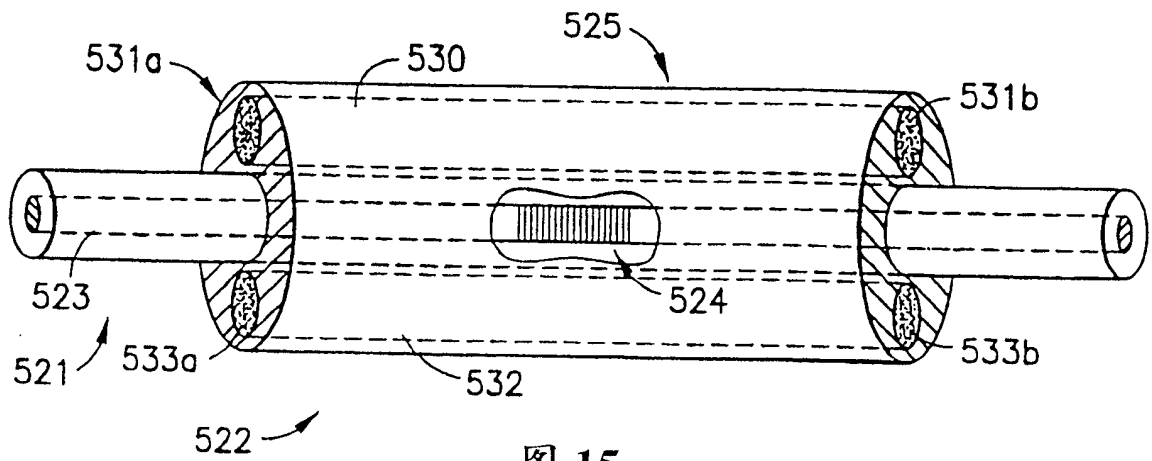


图 15

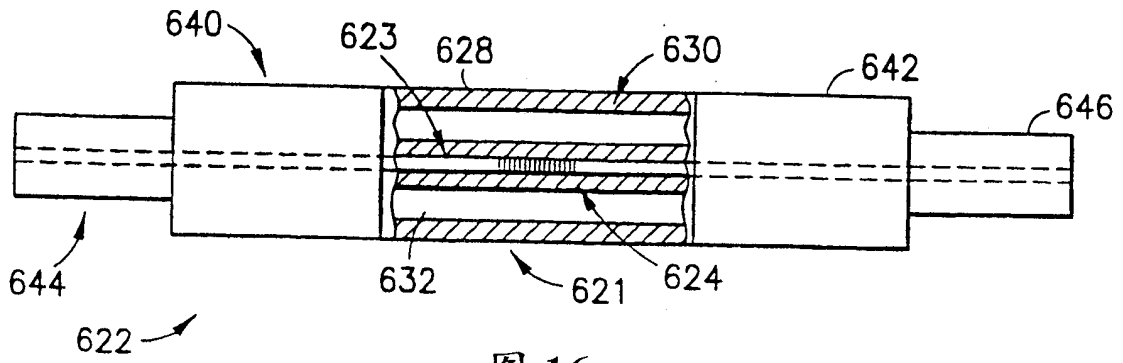


图 16

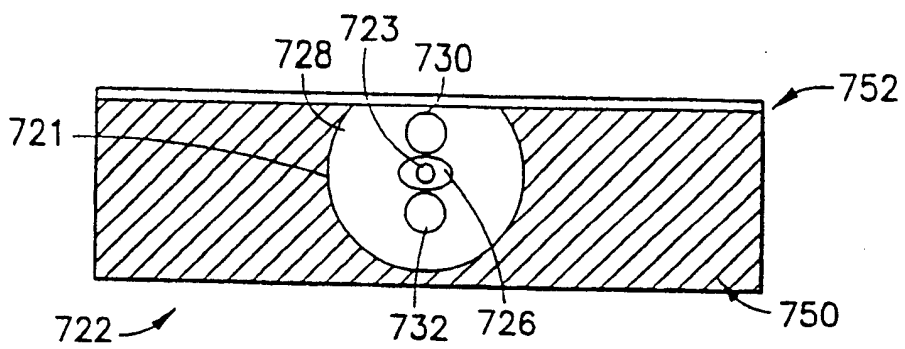


图 17

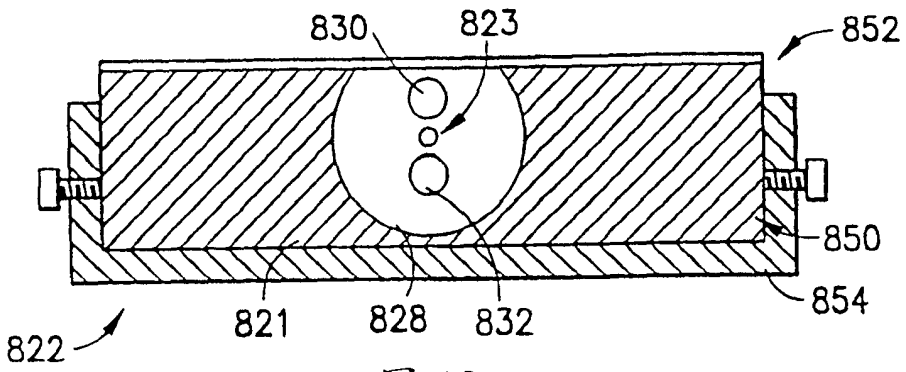


图 18

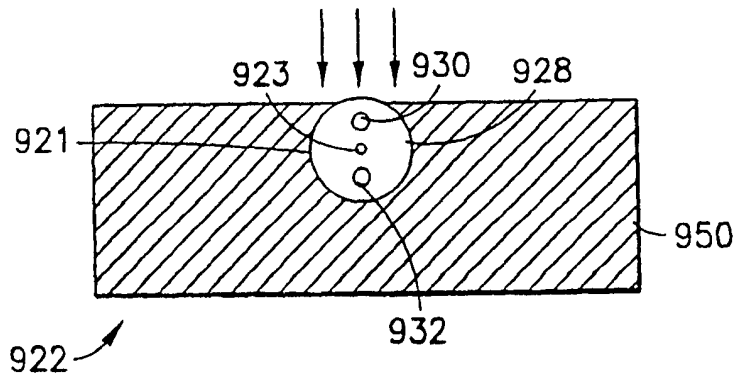


图 19

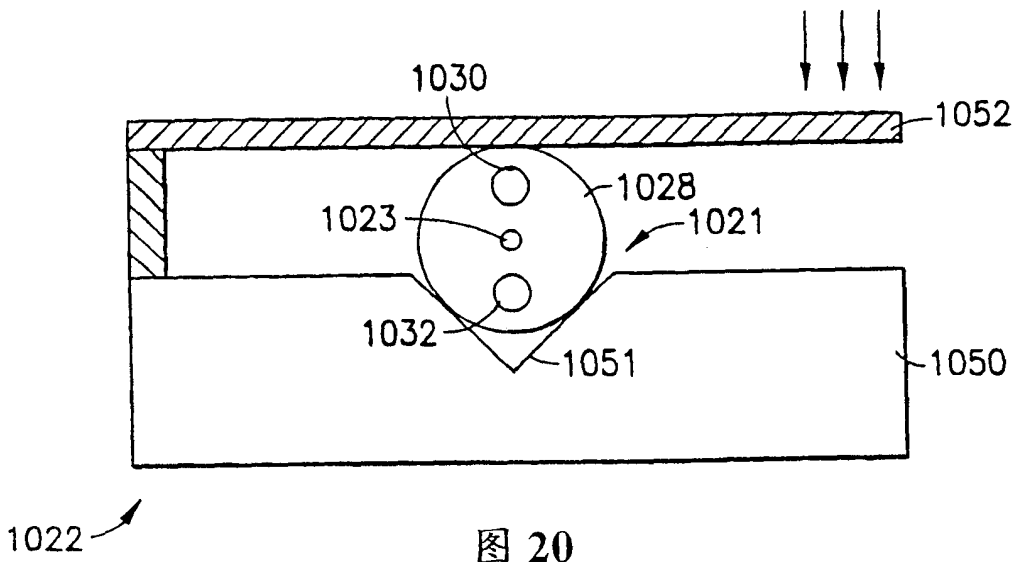


图 20

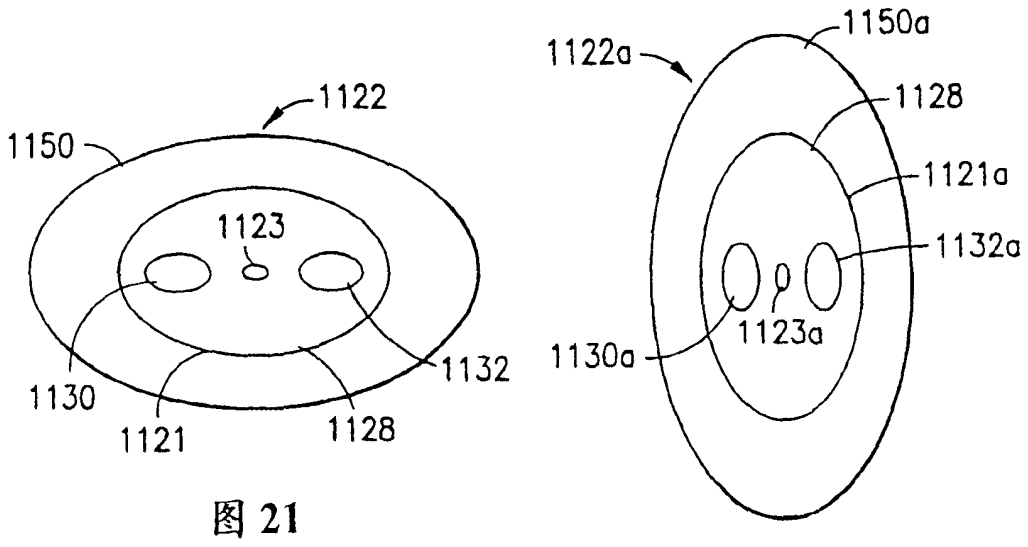


图 21

图 22

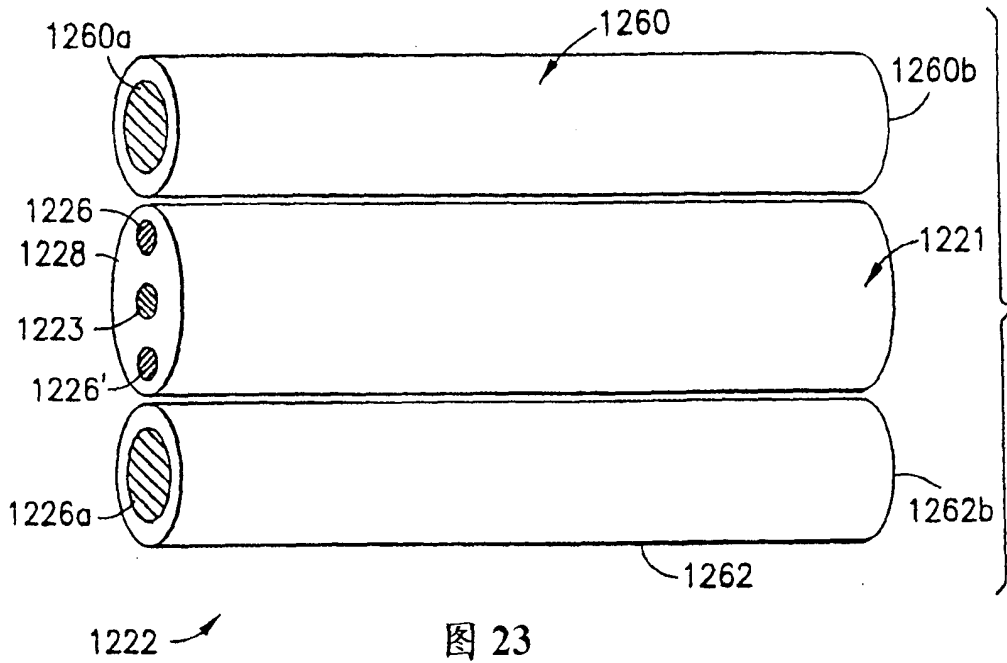


图 23

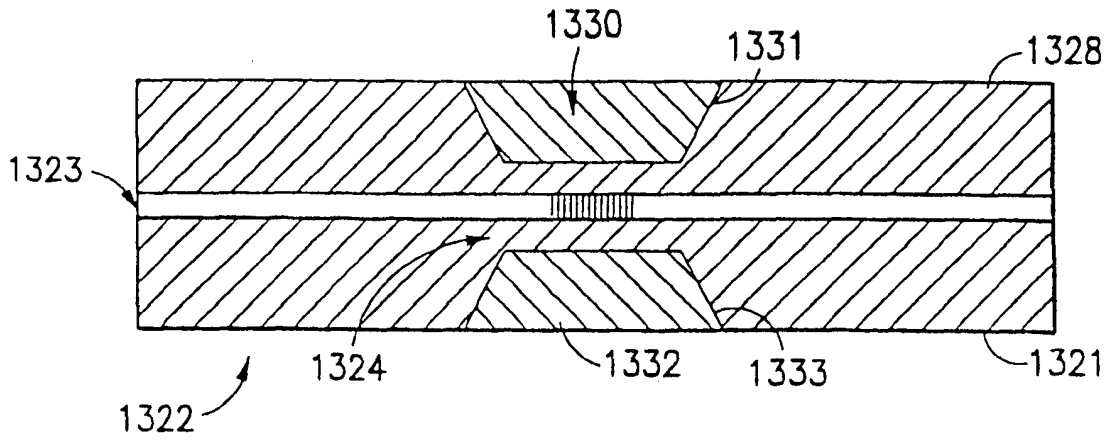


图 24

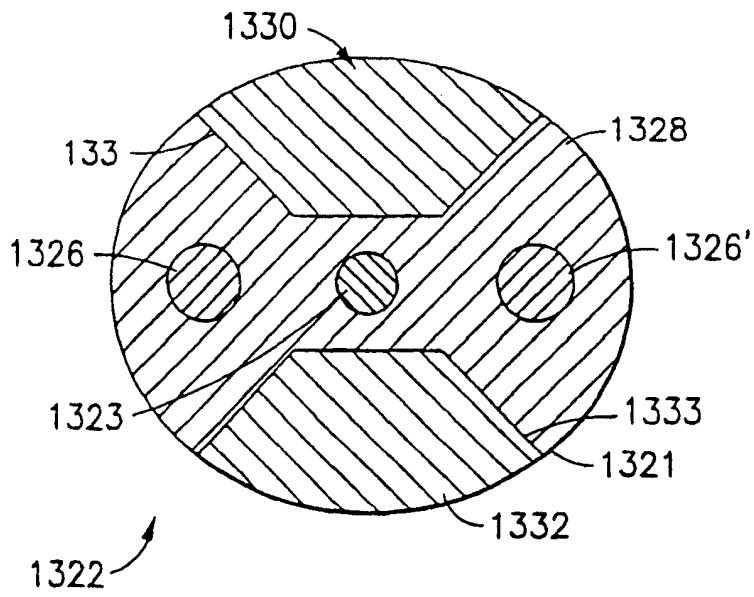


图 25