

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl⁷

G02B 3/14

G02F 1/01



[12] 发明专利申请公开说明书

[21] 申请号 02141675.3

[43] 公开日 2003 年 4 月 2 日

[11] 公开号 CN 1407353A

[22] 申请日 2002.9.10 [21] 申请号 02141675.3

[30] 优先权

[32] 2001. 9. 13 [33] US [31] 09/951,637

[71] 申请人 朗迅科技公司

地址 美国新泽西州

[72] 发明人 蒂摩菲·N·克鲁本金 杨 澍

[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

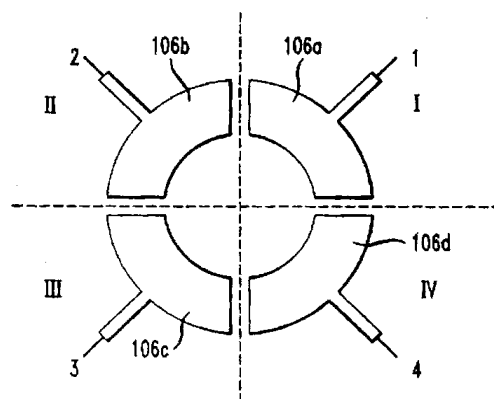
代理人 蒋世迅

权利要求书 3 页 说明书 13 页 附图 8 页

[54] 发明名称 具有润滑辅助电湿的可调谐液体微透镜

[57] 摘要

一种可调谐液体微透镜，包括一个绝缘层，一个透明导电液体微滴，以及位于该绝缘层的第一表面上及该微滴与该绝缘层之间的一个润滑层。该微透镜还包括通过该绝缘层及该润滑层与该微滴绝缘的多个电极，该多个电极使其可以被有选择地偏置，以在该微滴与该多个电极的每个之间产生各自的电压势，由此该微滴与平行于该绝缘层的第一表面的一个平面之间的一个角度可以改变，并且该微滴可以相对于该绝缘层重定位。



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

1.一种可调谐液体微透镜, 包括:

一个绝缘层;

一个透明导电液体微滴;

位于所述绝缘层的第一表面上及所述微滴与所述绝缘层之间的一个润滑层; 以及

通过所述绝缘层及所述润滑层与所述微滴绝缘的多个电极,

所述多个电极使其可以被有选择地偏置, 以在所述微滴与所述多个电极的每个之间产生各自的电压势,

由此所述微滴与平行于所述绝缘层的所述第一表面的一个平面之间的一个角度可以改变, 并且所述微滴可以相对于所述绝缘层重定位。

2.权利要求 1 的可调谐液体微透镜, 进一步包括一个微滴电极, 用于关于所述多个电极偏置所述微滴。

3.权利要求 2 的可调谐液体微透镜, 其中所述微滴电极包括位于沿所述绝缘层的第二表面的一个导电透明基底, 所述第二表面与所述第一表面相对, 所述绝缘层定义贯通所述绝缘层的一个小孔, 由此所述微滴至少部分占据所述小孔并且与所述微滴电极电通信。

4.权利要求 2 的可调谐液体微透镜, 其中所述微滴电极包括:

位于沿所述绝缘层的第二表面的一个导电透明基底, 所述第二表面与所述第一表面相对; 以及

使所述微滴耦合到所述导电透明基底的导线。

5.权利要求 1 的可调谐液体微透镜, 其中所述微滴被与所述微滴不混溶的润滑液体基本包围, 所述润滑液体包括所述润滑层。

6.权利要求 1 的可调谐液体微透镜, 其中所述润滑层包括硅油。

7.一种调谐液体微透镜的方法, 所述液体微透镜包括一个透明导电液体微滴, 一个绝缘层, 以及位于所述绝缘层的第一表面上及所述微滴与所述绝缘层之间的一个润滑层, 该方法包括步骤:

有选择地使通过所述绝缘层及所述润滑层与所述微滴绝缘的多个

电极偏置，以在所述微滴与所述多个电极的每个之间产生各自的电压势。

8. 权利要求 7 的方法，其中所述有选择地偏置的步骤包括有选择地偏置所述多个电极，以改变所述微滴与平行于所述绝缘层的所述第一表面的一个平面之间的一个角度，以及以使所述微滴相对于所述绝缘层重定位。

9. 一种设备，包括：

一个发送器，所述发送器提供一个光学信号；

一个接收器，所述接收器接收所述光学信号；以及

一个可调谐液体微透镜，用于使所述光学信号从所述发送器导向所述接收器，所述可调谐液体微透镜包括：

一个绝缘层；

一个透明导电液体微滴；

位于所述绝缘层的第一表面上及所述微滴与所述绝缘层之间的一个润滑层；以及

通过所述绝缘层及所述润滑层与所述微滴绝缘的多个电极，

所述多个电极使其可以被有选择地偏置，以在所述微滴与所述多个电极的每个之间产生各自的电压势，

由此所述微滴与平行于所述绝缘层的所述第一表面的一个平面之间的一个角度可以改变，并且所述微滴可以相对于所述绝缘层重定位，

由此可以调节所述微透镜的焦距及焦斑的横向位置，以使所述光学信号从所述发送器导向所述接收器。

10. 一种传输光学信号的方法，包括步骤：

使所述光学信号从第一位置导向一个液体微透镜，所述液体微透镜包括一个透明导电液体微滴，一个绝缘层，以及位于所述绝缘层的第一表面上及所述微滴与所述绝缘层之间的一个润滑层；以及

调谐所述液体微透镜以重导向所述光学信号，所述调谐步骤包括步骤：

有选择地使通过所述绝缘层与所述微滴绝缘的多个电极偏置，以在所述微滴与所述多个电极的每个之间产生各自的电压势。

具有润滑辅助电湿的可调谐液体微透镜

技术领域

本发明涉及微透镜，并且尤其涉及液体微透镜。

背景技术

大多数可调谐微透镜是具有静电控制的折射率的梯度折射率（GRIN）透镜，或者具有机械形状控制的柔性聚合物透镜。两项技术都具有内在的局限性，对这些现有的可调谐微透镜的性能施加了严格的限制。

可调谐梯度折射率透镜具有内在的局限性，与多数电光材料中发现的相对小的电光系数有关。这导致一个小的光学路径调制度，并且因此需要使用厚透镜或极高的电压。此外，许多电光材料显示很强的双折射，导致微透镜性质与偏振有关。

可机械调节的柔性透镜典型地比梯度折射率透镜具有宽得多的可调谐性范围。但是，它们的工作需要外部激励装置如微泵。这种装置微集成（microintegration）涉及很大的问题，在需要二维可调谐微透镜阵列的情况下尤其严重。

已经尝试使用其它技术制造可调谐微透镜，例如通过自装配单层（SAM）控制的液体微透镜。在2000年1月11日授权的 Wohlstadter 的美国专利号 6,014,259 中，描述了其中的一些尝试，这里其全部合并于此作参考。但是，利用自装配单层的微透镜，也存在一些问题，包括材料选择的严格限制，以及强烈的滞后，导致调谐电压断开后微透镜无法回到初始形状。此外，上述微透镜没有一个允许既调节透镜位置又调谐焦距。

在申请人的共同未决美国专利申请系列号 09/884,605, Timofei N. Kroupenkine 和 Shu Yang, 2001年6月19日申请，名称为“可调谐液体微透镜”中，提出了一个可调谐液体微透镜。605 申请的可

调谐液体微透镜允许既调节透镜位置又调谐焦距。在 605 申请中描述了一个示例性可调谐液体微透镜的一个实施例中，一个透明导电液体的微滴位于包括氟化聚合物例如高度氟化烃的一个支撑基底上。该配置提供了一个液体微透镜，高度可调谐，并且不存在电湿（electrowetting）过程中会发生的众所周知的滞后及粘滑（stick-slip）效应。

发明内容

虽然 605 申请提供了一个示例性可调谐液体微透镜，但是对于一个可调谐液体微透镜，仍然需要提供材料选择上的更大自由度以及极好的可调谐性，同时减小或消除接触角滞后及粘滑效应。这通过一个改进的可调谐液体微透镜实现，该液体微透镜包括一个绝缘层，一个透明导电液体的微滴，以及根据本发明的原理，位于绝缘层的第一表面上以及微滴与绝缘层之间的一个润滑层。该微透镜还包括多个电极，通过绝缘层及润滑层与微滴绝缘，该多个电极的布置使其可以被有选择地偏置，以在微滴与每个电极之间产生各自的电压势，由此可以改变微滴与垂直于绝缘层第一表面的一个平面之间的角度，并且微滴可以相对于绝缘层重定位。

具有润滑辅助电湿的可调谐液体微透镜允许既调节透镜位置又调谐焦距。此外，该可调谐液体微透镜提供了材料选择上的更大自由度，无接触角滞后或粘滑效应，同时提供极好的调谐控制。

附图说明

附图表示本发明的优选实施例，以及与本公开有关的其它信息，其中：

图 1A 是光波通过一个液体微透镜的图解表示；

图 1B 是电湿现象的图解表示；

图 2A 是本发明的一个可调谐液体微透镜的图解表示；

图 2B 表示用于本发明的一个可调谐液体微透镜的一个示例性电极图形；

图 2C-2E 表示本发明的可调谐液体微透镜对于图 2B 的电极的选

定偏置的反应；

图 3A-C 是根据本发明的一个可调谐液体微透镜的示例性实施例的图解表示；

图 4 表示包括本发明的一个可调谐液体微透镜的一个光学系统；

图 5 是包括一个平面波导及本发明的一个可调谐液体微透镜的一个设备的图；

图 6 是利用一个润滑层的本发明的一个可调谐液体微透镜的一个示例性实施例的图解表示；

图 7 是利用一个润滑层的本发明的一个可调谐液体微透镜的另一个示例性实施例的图解表示；以及

图 8 是表示图 6 和图 7 的微透镜上的材料选择的影响的曲线图。

应当理解到这些图是用于图解的目的，并且未按比例绘制。

具体实施方式

在详细描述本发明的可调谐液体微透镜之前，首先给出一个通常液体微透镜的描述以及电湿现象的一个描述。

参考图 1A，显示一个液体微透镜 10。该微透镜 10 包括一个透明液体例如水的小微滴 12，直径典型地（但不是必要地）从几微米到几毫米。微滴 12 位于一个透明基底 14 上。该基底典型地为疏水的或者包括一个疏水涂层。该液体及基底仅需要对于一个选定波长范围内的光波透明。光波由参考数字 16 表示。光波通过液体微透镜 10 并且聚焦在焦平面上的一个焦点或焦斑（由参考数字 18 表示）处，该焦平面距微滴 12 与基底 14 之间的接触平面为焦距 “f”。

微滴 12 与基底 14 之间的接触角 “ θ ” 由界面表面张力（也称为界面能） “ γ ” 决定，通常以毫牛顿每米（mN/m）为单位。如这里所用， γ_{S-V} 为基底与围绕基底 14 的空气、气体或其它液体之间的界面张力， γ_{L-V} 为微滴 12 与围绕微滴 12 的空气、气体或其它液体之间的界面张力，以及 γ_{S-L} 为基底 14 与微滴 12 之间的界面张力。接触角 θ 可以由方程（1）决定：

$$\text{方程 (1)} \quad \cos \theta = \frac{\gamma_{S-V} - \gamma_{S-L}}{\gamma_{L-V}}$$

微滴 12 的表面曲率半径 “R” 以米为单位, 根据如下方程 (2) 由接触角 θ 与以立方米 (m^3) 为单位的微滴体积决定:

$$\text{方程 (2)} \quad R^3 = \frac{3 \times \text{体积}}{\pi(1 - \cos\theta)(2 - \cos^2\theta - \cos\theta)}$$

焦距以米为单位, 是半径 R 与折射率 “n” 的函数, 其中 n_{Liquid} 为微滴 12 的折射率, n_{Vapor} 为围绕微滴 12 的空气、气体或其它液体的折射率。焦距 f 可以由方程 (3) 决定:

$$\text{方程 (3)} \quad f = \frac{R}{n_{\text{Liquid}} - n_{\text{Vapor}}}$$

基底的折射率并不重要, 因为光波的入射和出射平面平行。因此, 微透镜 10 的焦距是接触角 θ 的函数。

图 1B 演示了可以使用电湿现象可逆地改变一个导电液体(可以是或不是透明的)的微滴 22 与一个电介质绝缘层 24 之间的接触角 θ , 该绝缘层的厚度用 “d” 表示, 介电常数为 ϵ_r 。一个电极, 例如金属电极 26, 位于该电介质层 24 下面, 并且通过层 24 与微滴 22 绝缘。微滴 22 可以是例如一个水滴, 基底 24 可以是例如一个聚四氟乙烯/聚对苯二亚甲基 (parylene) 表面。

当微滴 22 与电极 26 之间无电压差时, 微滴 22 保持由微滴 22 的体积及接触角 θ_1 定义的形状, 其中 θ_1 如上所述由界面张力 γ 决定。虚线 28 表示当电极 26 与微滴 22 之间施加一个电压时, 微滴 22 在层 24 上从其相对于电极 26 的中心位置同等地展开。电压可以从几伏到几百伏。确切地, 当电极 26 与微滴 22 之间施加电压时, 无论极性, 接触角 θ 从 θ_1 减小到 θ_2 。展开量, 即, 由 θ_1 与 θ_2 之差决定, 是被加电压 V 的函数。接触角 θ_2 可以由方程 (4) 决定:

$$\text{方程 (4)} \quad \cos\theta(V) = \cos\theta(V=0) + \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{2d\gamma_{L-V}} V^2$$

其中 $\cos\theta(V=0)$ 为微滴 22 与电极 26 之间未施加电压时绝缘层 24 与微滴 22 之间的接触角, γ_{L-V} 为上述微滴界面张力, ϵ_r 为绝缘层的介电常数, ϵ_0 为 $8.85 \times 10^{-12} \text{F/m}$ —— 真空的介电常数。

图 2A 和 2B 表示如下所述可以既改变位置又改变焦距的一个可调谐液体微透镜。确切地参考图 2A, 可调谐液体微透镜 100 包括位于一个透明电介质绝缘层 104 的第一表面上的一个透明导电液体的微滴

102。绝缘层 104 可以是，例如，具有氟化聚合物例如高度氟化烃涂层的聚酰亚胺。无论如何，绝缘层 104 应当提供预定值的接触角及接触角滞后，并且具有适用于被加电压的较高的电介质击穿强度。微透镜 100 包括通过绝缘层 104 与微滴 102 绝缘的多个电极 106a-106d。微透镜 100 也可以包括一个透明支撑基底 110，支撑电极 106 和绝缘层 104。电极 106 和支撑基底 110 可以分别是，例如，金和玻璃。

图 2B 是电极 106a-106d 的一个示例性配置的顶视图。尽管显示四个电极 106a-106d 的配置，但是，可以根据微透镜 100 的调谐的所需的控制水平利用其它数量、组合及图形的电极 106。每个电极 106a-106d 耦合到各个电压 V_1 - V_4 ，并且最初相对于电极 106 居中的微滴 102 耦合到微滴电极 108，微滴电极 108 耦合到电压 V_0 。

当微滴 102 与任何电极 106 之间无电压差（即 $V_1=V_2=V_3=V_4=V_0$ ）并且微滴相对于电极 106 和象限 I 至 IV 居中时，微滴 102 呈现根据上述方程（1）-（3）由接触角 θ 及微滴 102 的体积决定的形状。图 2C 用虚线表示微滴 102 的这个初始位置。通过有选择地在微滴 102 与电极 106 之间施加一个电压势，可以调节微滴 102 的位置及微透镜 100 的焦距。如果在所有四个电极上施加相同的电压，即 $V_1=V_2=V_3=V_4 \neq V_0$ ，则微滴 102 在象限 I、II、III 和 IV 中同等地（即沿横轴 X 和 Y 同等地）展开，如图 2D 的虚线所示。本质上，微滴 102 与绝缘层 104 之间的接触角 θ 减小。在此情况下，微透镜 100 的焦距从初始接触角时（即 $V_1=V_2=V_3=V_4=V_0$ 时）的微透镜焦距增大。

图 2E 表示，通过有选择地使电极 106 相对于微滴 102 偏置，也可以相对于绝缘层 104 的第一表面上微滴 102 的初始位置改变微滴 102 沿 X 和 Y 轴的横向位置。例如，通过使 $V_1=V_3=V_0$ ，且通过使 V_2 大于 V_4 ，微滴 102 被吸引向电极 106b 的较高电压并且移向象限 II。通过调节微滴 102 的横向位置，也调节了焦平面上微透镜的焦斑的横向位置。

从上述例子应当很明显，电极 106 可以以任何数量的组合相对于微滴电极（并且因此微滴 102）有选择地偏置，以调节接触角 θ ，并且由此修改微透镜 100 的焦距。同样地，电极 106 可以以任何数量的组

合有选择地偏置，以使微滴 102 相对于绝缘层 104 上的初始位置重定位，由此调节微透镜的焦斑的横向位置。因此，微透镜允许三维调节焦斑——焦斑的位置由焦距及焦平面上焦斑的横向位置决定，焦平面与微透镜的第一表面平行且距微透镜为一个焦距。

图 3A 表示使微滴 102 耦合到一个电压 V_0 ，例如地或其它恒定电压水平的一个方式。微透镜 100a 可以包括一个支撑基底 110a，支撑基底 110a 包括一个导电玻璃，例如铟锡氧化物玻璃。该导电玻璃耦合到电压 V_0 ，并且电极 116 使基底 110a 耦合到微滴 102。电极 116 和支撑基底 110a 可以共同视为一个微滴电极。图 3A 还表示绝缘电介质层 104 可以包括一个电介质层 114 以及一个疏水涂层 112。涂层 112 应当提供一个相对高的接触角 θ 。一个例子是高度氟化聚合物，例如聚四氟乙烯或具有与聚四氟乙烯类似的化学结构的其它材料。低表面能材料，例如含硅聚合物或分子也是适合的。在一个实施例中，绝缘层 104a 包括位于一个聚酰亚胺电介质层 114 上的一个聚四氟乙烯薄膜的涂层 112。

在图 3B 的投影图所示的一个微透镜 100B 的另一个实施例中，微滴电极 116 可以是，例如，在一个区域或多个区域蒸发或相反沉积在绝缘层 104（未显示）的第一表面上的一个金电极，当微滴 102 沿绝缘层 104 的第一表面改变位置时，保证电极 116 与微滴 102 保持接触。尽管电极 116 用于当微滴 102 改变位置时与微滴 102 保持接触，但是微滴 102 基本位于绝缘层 104 的第一表面上。微透镜 100B 可以包括一个支撑基底 100a，支撑基底 100a 不需要是导电的并且可以是例如不导电的玻璃，用作绝缘层 104 与电极 106 的机械支撑层。如果那样，则微滴电极 116 可以直接耦合到电压 V_0 。或者，支撑层 110a 可以是耦合到电压 V_0 的导电玻璃基底。在该实施例中，微滴电极 116 可以耦合到支撑层 110a。图 3B 还显示电极 106a-106d 及其各自的电源线 118a-118d，电源线 118a-118d 分别耦合到电压 V_1 - V_4 。尽管图 3B 未显示绝缘层 104，但是这仅是用于图解目的，并且绝缘层 104 使微滴 102 及电极 116 与电极 106a-106d 绝缘。

图 3C 表示一个可调谐液体微透镜 100C 的一个示例性实施例，其中不需要电极 116，由此减少了电极 116 与微透镜的任何潜在干涉。微透镜 100C 包括位于绝缘层 104b 的第一表面上的微滴 102。微透镜 100C 还包括一个透明导电支撑层 110a，用作一个微滴电极，位于与绝缘层 104b 的第一表面相对的绝缘层 104b 的第二表面。显示微透镜 100C 的横截面，以表示绝缘层 104b 包括由绝缘层 104b 定义并贯通的一个小孔 118。微滴 102 占据小孔 118 的至少一部分，由此使微滴 102 与微滴电极即支撑基底 110a 电通信。然后支撑基底 110a 耦合到电压 V_0 。在此示例性实施例中，绝缘层 104b 也不是必须是透明的，只要小孔足够大，使得通过小孔的光足够用于特定应用。

液体微滴可以是对于所需波长透明并且固有导电或者可以例如通过使用各种添加剂使其导电的任何液体。典型的例子包括各种盐的水溶液。电极可以是任何固体导电材料，可以是或不是透明的，例如金、铝或铟锡氧化物玻璃。绝缘层可以是提供足够高的电介质强度以及预定值的接触角及接触角滞后的任何固体电介质或一组固体电介质。绝缘层可以是或不是透明的。例子包括固体聚合物，例如聚酰亚胺和聚对苯二亚甲基。支撑基底可以是对于给定波长透明的任何基底，例如玻璃或固体聚合物。被加电压取决于选定材料、微透镜的布局以及接触角的所需变化，如方程 (1) - (4) 所指导。典型的电压可以在 0 伏与大约 200 伏之间变化，尽管可接受的电压不限于此范围。

在一个实施例中，微透镜的液体微滴可以被与微滴不混溶的液体基本包围。周围的液体可以有助于防止微透镜微滴蒸发。当微滴是水基的时，可以使用各种油或高分子重醇（例如戊醇、辛醇等）。

图 3C 的微透镜 100C 被测试。该微透镜包括微滴 102，微滴 102 包括 20 μ l 的 0.01 KNO₃ 水溶液。绝缘层 104b 包括一个 3 μ m 厚的聚酰亚胺层，涂覆一层极薄 (≈ 0.02 至 2 μ m) 的高度氟化聚合物，提供大约 109° 的初始接触角。一组四个金电极 106 如图 2B 和 3C 所示排列。微透镜包括一个 ITO (铟锡氧化物) 玻璃板作为图 3C 所示的导电透明支撑基底 110a。施加 0V 与大约 150V 之间的工作电压。

且在所示方向使光 502 导向光电探测器 506。为了调谐微透镜 100 以优化光从平面波导 504 到光电探测器 506 的传输，可以有选择地偏置可调谐液体微透镜 100 的电极，以调节微透镜 100 的焦距及横向焦斑位置。通过应用适当的电压保持微透镜的形状。

图 6 和 7 表示一个可调谐液体微透镜的另一个示例性实施例，该微透镜能够既改变焦斑位置又改变焦距，同时增大了可调谐液体微透镜中可利用的材料范围。首先，简要提供了“粘滑”现象的概述。如结合图 1B 在上面提供的电湿的概述中所提到的，通过在电极 26 与微滴 22 之间施加电压，可以改变层 24 与微滴 22 之间的接触角 θ 。粘滑现象会导致接触角 θ 在被加电压下递增地改变，而不是从初始接触角平滑地过渡为最终接触角。当施加电压时，微滴可以“粘”在基底 24 的表面并且保持第一接触角 θ_x 一段时间。最后，在被加电压下，微滴“滑动”以定义一个新的接触角 θ_y 。在初始接触角与最终接触角之间的过渡过程中，这些递增的跳跃可能发生好几次，取决于被加电压。因为微滴最初粘然后滑，所以接触角 θ 递增地改变，并且落在例如 θ_x 与 θ_y 之间的接触角不能容易地实现。

相信粘滑现象主要是由于基底 24 中的不均匀性、杂质或污染物引起的，导致微滴 22 与基底 24 之间界面张力的局部不一致性。粘滑现象会限制利用电湿精确调谐微透镜的能力。

与粘滑现象密切相关的另一个现象是接触角滞后现象。接触角滞后是指前进微滴的接触角（如在电压从例如 0V 增大到 V_0 过程中在给定电压 V_0 处得到的角度）与缩进微滴的接触角（如在相同电压 V_0 处但在电压从例如 V_0 减小到 0V 过程中得到的角度）之差。接触角滞后导致微滴接触角与微滴历史有关——即电压是减小还是增大——并且使通过电湿的微滴控制变复杂。并且，如果该滞后足够高，当去掉电压时，它将阻止微滴回到其初始形状。但是，注意尽管粘滑和接触角滞后是密切相关的现象，但是它们不是相同的。特别是，在某些条件下有可能获得与任何明显的粘滑特性无关的接触角滞后特性。

关于结合图 2A 至 3C 所述的示例性可调谐液体微透镜，通过选择

演示了微透镜的焦距在 6mm 与 8mm 之间范围内的可逆调节。还演示了沿绝缘层表面在任何横向方向大约 3mm 范围内的微透镜位置的调节。应当理解到得到的结果不表示微透镜的限制，而是用于表明可以制造能既改变焦距又改变焦斑位置的一个可调谐液体微透镜。

由上应当很明显，所述微透镜可以设计为当微滴与电极 106 之间无电压差时具有所需的接触角 θ 以及所需的接触角滞后。这可以通过选择如上述方程所指导的适当的材料、尺寸及体积实现。因此微透镜允许微滴曲率及位置控制上的很大自由度，由此导致微透镜、焦距、焦斑位置及数值孔径上的宽范围的可调谐性。

一个普通熟练的技术人员应当认识到本发明的微透镜可以在一些光电应用中利用。例如，微透镜可以用于实现一个光学信号发送器 204 如激光器与一个光学信号接收器 202 如光电探测器之间的最佳耦合。这在图 4 中表示。从图 4 应当理解到来自发送器 204 的光学信号是发散的，并且将在焦平面 206 后面聚焦。如上所述通过有选择地偏置多个电极 106 以实现最佳耦合，可以调节透镜焦距以及微透镜 100 的焦平面 206 内焦斑 208 的横向定位。偏置电极可以被有选择地偏置，直到在接收器 202 处探测到最大功率——表示发送器 204 与接收器 202 之间的最佳耦合。目前，光电组件，即并入光电元件的物理设备，例如激光器和/或光电探测器，通过使部件物理地移动以实现最佳耦合而被定标。该过程可能很慢并且相当昂贵。通过在设备中包括本发明的至少一个微透镜，可以不需要物理地对准部件以实现最佳耦合。更确切地说，可以调节本发明的微透镜的焦距及焦斑的横向位置，以使光学信号从一个发送器重导向到一个固定的接收器。

在图 5 所示的另一个示例性应用中，利用本发明的一个微透镜 100，或多个微透镜，使一个光电元件如光电探测器 506 与一个嵌入式平面波导 504 耦合，光电探测器 506 通过一个球格阵列在一个印刷电路板 500 上进行表面安装。光通过平面波导 504 的芯 502 传播，如方向箭头所示。光被反射镜边缘 508 反射到印刷电路板 500 的上表面 510。一个可调谐液体微透镜 100 位于印刷电路板 500 的上表面 510 上，并

包括例如氟化聚合物如高度氟化烃的一个合适的绝缘层，可以避免任何明显的接触角滞后及粘滑。尽管这是避免滞后及粘滑问题的一个可接受的解决方案，但是还需要扩大可用作本发明的可调谐液体微透镜中绝缘层的材料的范围。

参考图 6，表示一个可调谐液体微透镜 600。可调谐液体微透镜 600 具有与图 2A 的微透镜 100 相同的基本结构，并且同样的元件共用相同的参考数字。但是，可调谐液体微透镜 600 包括位于绝缘层 104 的第一表面上的一个相对薄的润滑层 800（用剖面线表示）。润滑层 800 在绝缘层 104 的第一表面上展开，并且微滴 102 位于润滑层 800 上，使得润滑层 800 位于绝缘层 104 与微滴 102 之间。

角度 θ_a 通常在微滴 102 与平行于绝缘层 104 的第一表面的一个平面 602 之间定义。如同结合图 2A-3C 所述的接触角 θ ，通过在电极 106 与微滴 102 之间有选择地施加电压，可以改变角度 θ_a 。这样，可调谐微透镜 600 的焦距。润滑层使微滴 102 与绝缘层 104 隔离，并且在微滴 102 与润滑层 800 之间提供空间均匀的界面张力。因为微滴 102 不接触任何局部不均匀性或杂质，否则将导致微滴 102 与绝缘层 104 之间的接触角滞后及粘滑效应，所以可以选择更宽范围的材料用于绝缘层 104。

如同图 2A-3C 的微透镜，该微透镜还可以通过有选择地偏置电极 106，改变其相对于绝缘层 104，即沿平面 602 的位置。这样，可以改变可调谐液体微透镜 600 的焦斑位置。

图 6 表示当微滴 102 位于润滑层 800 上时，绝缘层 800 可以作为使液体微滴 102 与绝缘层 104 隔离的一个液体层。在图 7 所示的另一个示例性可调谐液体微透镜 700 中，微透镜 700 包括周围的液体 802（用剖面线表示），液体 802 包括润滑层 800，液体 802 与微滴 102 不混溶，并且基本包围微滴 102 的表面。

角度 θ_b 在微透镜 700 的微滴 102 与平行于绝缘层 104 的第一表面的一个平面 604 之间定义。如同微透镜 600，通过相对于微滴 102 有选择地偏置电极 106，可以改变角度 θ_b ，以改变微透镜 700 的焦距。并

且，微滴 102 可以相对于绝缘层 104，即沿平面 604 重定位，以改变微透镜 700 的焦斑位置。

如图 6 和 7 所示，润滑层 800 可以沿绝缘基底 104 的第一表面展开，或者微透镜微滴 102 可以完全浸没在包括润滑层 800 的液体 802 中。润滑层 800 应当对于所需的光波长透明，尽管如果利用图 3C 所示的带小孔 118 的一个结构可以不必这样。在此情况下，如果选择用于支撑导电层的材料的表面能超过某个阈值，则润滑层不占据小孔 118。这是因为润滑剂可以仅弄湿（即提供零接触角）具有低于如下进一步说明的某个阈值的表面能的表面。润滑层应当是电介质的，并且其选择方式应当使其弄湿微透镜微滴 102 下面的电介质基底 104。一个示例性润滑层 800 包括与微滴 102 不混溶的一个低表面能的液体。一个示例性液体是硅油。也可以使用许多氟化有机液体，例如氟硅氧烷如 FMS-131、FMS-221（聚（3,3,3-三氟丙基甲基硅氧烷））及 SIB1816.0[双（十三氟辛基）四甲基硅氧烷]，可从 Gelest, Inc of Tullytown, Pennsylvania 获得。基底通过润滑层的弄湿可以是完全的或者在润滑层与绝缘层 104 之间具有一个有限的但是小的接触角。在两种情况下，润滑层 800 在微透镜微滴 102 的下面自然地构成一个薄层，并且基本阻止了接触角滞后及“粘滑”特性。

图 6 的微透镜 600 与图 7 的微透镜 700 都显示一个润滑层 800 使微滴 102 与绝缘层 104 隔离。为了保证润滑层 800 在微滴 102 与绝缘层 104 之间构成一个隔离层，必须选择具有合适的表面能 γ 的材料。当然，可以稍微通过试验及误差选择材料，但是也可以利用以下的原理。

假定例如最简单的理论情况：微滴 102 为球形，如图 7 所示，当微滴 102 与电极 106 之间未施加电压时，即微滴 102 的表面被液体 802 完全包围，并且微滴 102 与平行于绝缘层 104 的第一表面的一个平面 604 成 180° 角。当未施加电压时，角度 θ_b 最初由基底 104 与微滴 102 之间的界面张力 (γ_{S-L})、基底 104 与润滑液体 800 之间的界面张力 (γ_{S-F}) 以及微滴 102 与润滑液体 802 之间的界面张力 (γ_{L-F}) 决定。角度 θ_b 可以通过以下方程 (5) 决定：

$$\text{方程 (5)} \quad \cos\theta_b = \frac{\gamma_{S-F} - \gamma_{S-L}}{\gamma_{L-F}}$$

其中 γ_{ij} ($i, j=S, L$ 或 F) 为上述界面表面能。 γ_{ij} 的值可以根据方程 (6) 决定:

$$\text{方程 (6)} \quad \gamma_{ij} = \gamma_i + \gamma_j - 2\Phi_{ij}\sqrt{\gamma_i\gamma_j}$$

其中 Φ_{ij} 为无量纲的交互作用参数, 可以从有关材料的分子性质计算, 并且对于有机系统接近于 1。

例如, 如所述 γ_{S-L} 表示基底 104 与微滴 102 之间的界面表面张力或界面能。基底 104 的表面能表示为 γ_S 。该符号指的是所讨论材料 (在此情况下如基底 104) 与其饱和蒸汽之间的界面表面能。

此外, 如果 θ_b 为 180° ——上述情况下保证润滑层 800 使绝缘层 104 与微滴 102 隔离的条件——则 $\cos\theta_b$ 为负 1 (-1)。为了设计 180° 的接触角, 则从方程 (5) 得到方程 (7):

$$\text{方程 (7)} \quad \frac{\gamma_{S-F} - \gamma_{S-L}}{\gamma_{L-F}} \leq -1, \text{ 或 } \gamma_{S-F} - \gamma_{S-L} \geq \gamma_{L-F}$$

该概念在图 8 中最好地表示, 图 8 是对于两个不同的 γ_F ——20mN/m 和 16mN/m, 绝缘层的角度 θ_b 关于 γ_S 的曲线, 分别对应包括 DMS-T11 硅油和 DMS-T00 硅油的润滑液体, 二者都由 Gelest, Inc of Tullytown, Pennsylvania 制造。图 8 的曲线可以利用方程 (5) 和 (6) 生成。假定微滴 102 为水, γ_L 为 72mN/m。从图 8 的曲线, 假定微滴 102 以及特征为 16mN/m 的 γ_F 的润滑液体 802, 如果绝缘层 104 的材料特征 γ_S 小于或等于大约 26mN/m (用虚线 902 表示), 则达到 180° 的角度 θ_b , 并且还满足方程 (7)。同样地, 假定微滴 102 以及特征为 20mN/m 的 γ_F 的润滑液体, 如果绝缘层 104 的材料特征 γ_S 小于或等于大约 36mN/m (用虚线 904 表示), 则达到 180° 的角度 θ_b 。

以上例子演示了如果使用润滑液体辅助电湿, 则可以使用一个宽范围的材料及其各自的沉积技术。甚至, 为了提供无润滑剂的无粘滑、低滞后特性, 应当使用一个高度均匀、超洁净、低能的表面。这很大程度上使可用的材料限制为例如高度氟化烃的材料及类似材料。此外, 选定的材料必须仔细沉积, 以保证所需程度的洁净度及表面均匀性。有可能克服这些问题, 但是解决方案可能潜在涉及复杂的和昂贵的步

骤和设备。另一方面，使用润滑层 800 允许较大范围的材料选择，因为不需要高度均匀、超洁净、低能的表面。例如，如果使用 γ_F 为 20mN/m 的润滑剂，则较宽范围的材料将满足表面能 γ_S 小于大约 36mN/m 的条件，包括普通的聚合物例如聚丙烯、聚乙烯、聚苯乙烯等。并且，较少需要避免材料沉积过程中的表面污染物及非均匀性，因此导致较简单且较不昂贵的沉积技术。

尽管显示可调谐液体微透镜 600、700 具有图 2A 所示的基本结构，但是例如结合图 3A-3C 显示及描述的其它微透镜结构是同样合适的。同样，可调谐液体微透镜 600、700 可以用于例如结合图 4 和图 5 描述的各种光电应用中。

可调谐液体微透镜 600、700 可以既调节透镜位置又调谐焦距。此外，可调谐液体微透镜 600、700 在材料选择上提供更大的自由度，同时通过避免接触角滞后及粘滑现象提供极好的可调谐性。

尽管是按照示例性实施例来描述本发明的，但是并不限于此。更确切地，附加的权利要求书应当被广泛地解释为包括那些熟练的技术人员可以不偏离本发明的等价物的界限和范围而进行的本发明的其它变型和实施例。

图 1A

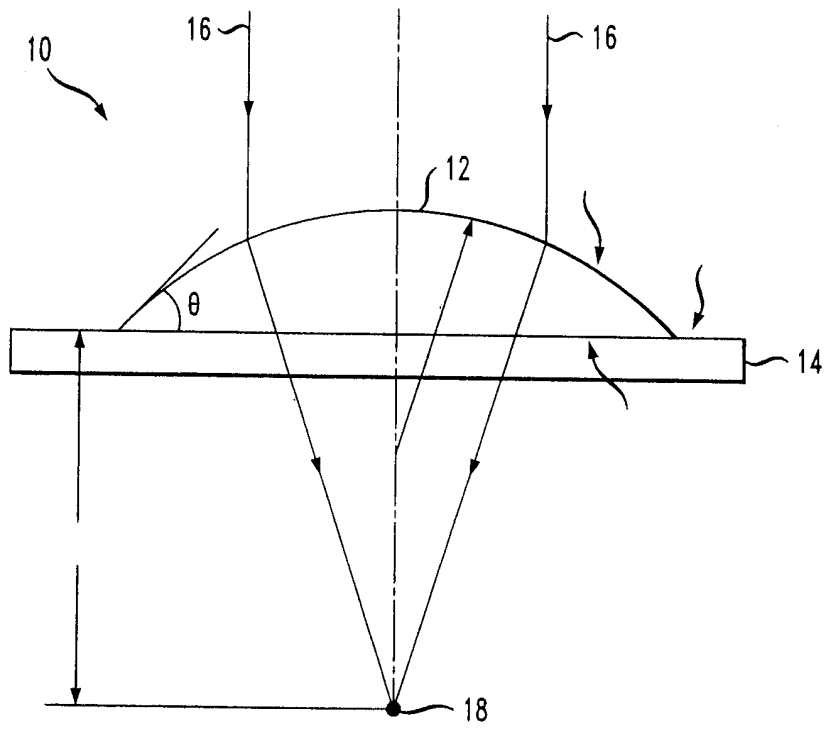


图 1B

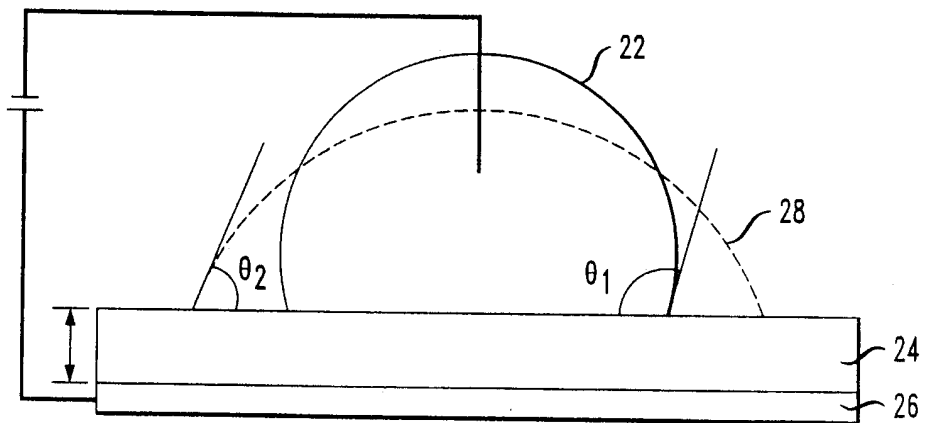


图 2A

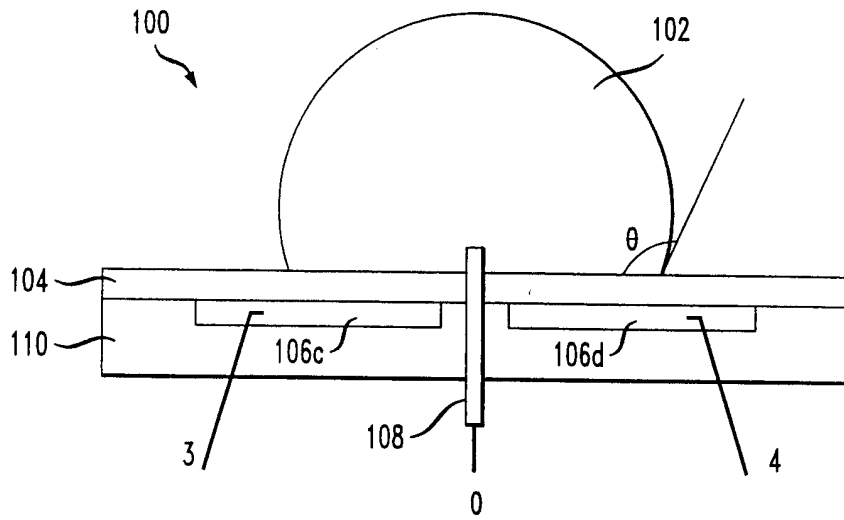


图 2B

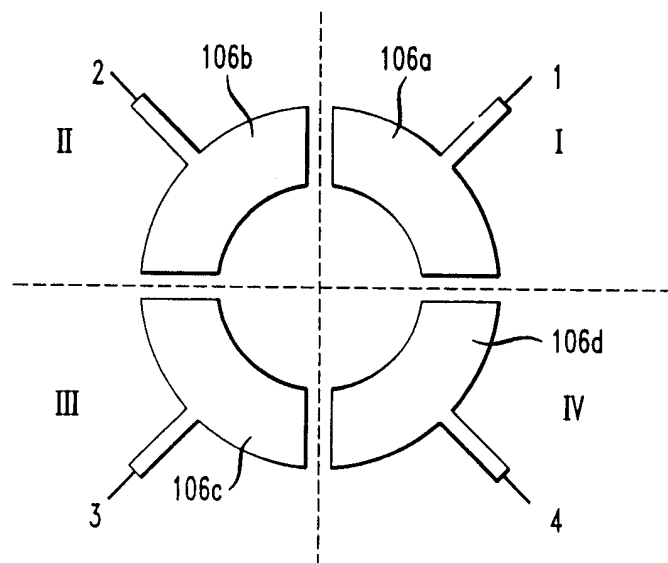


图 2C

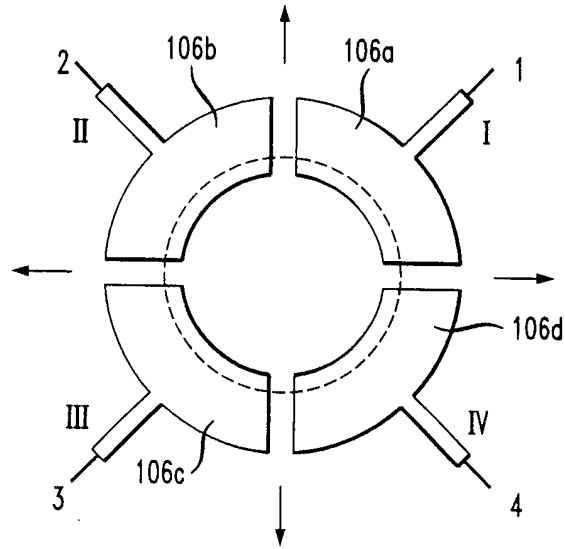


图 2D

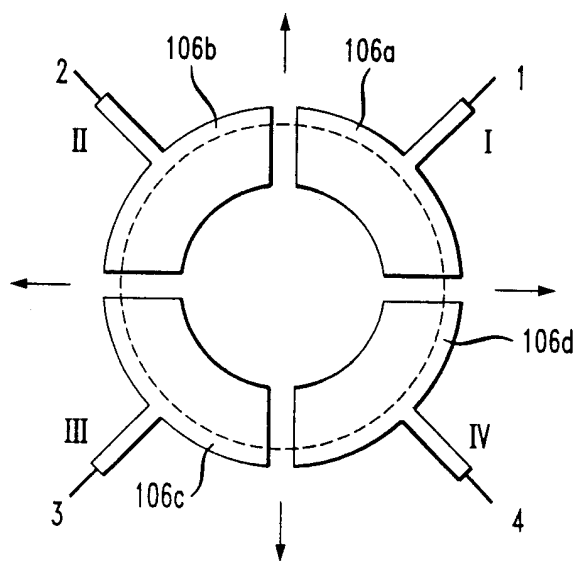


图 2E

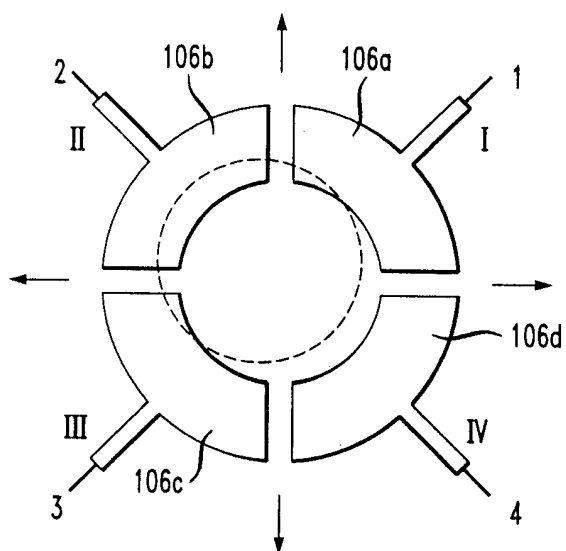


图 3A

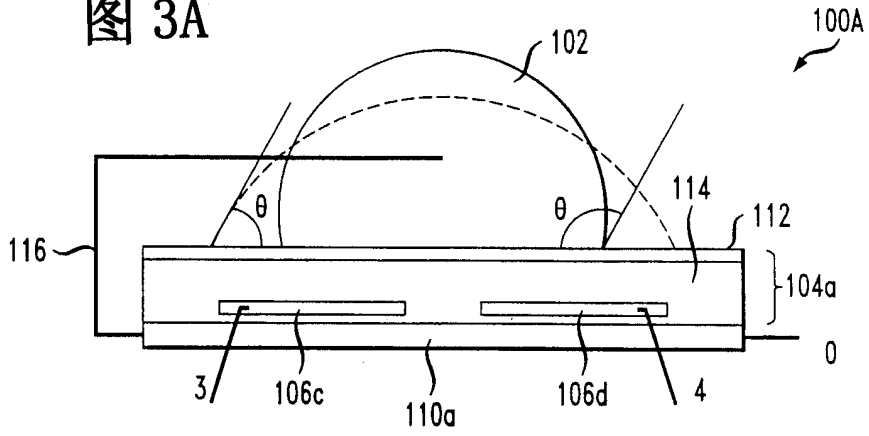


图 3B

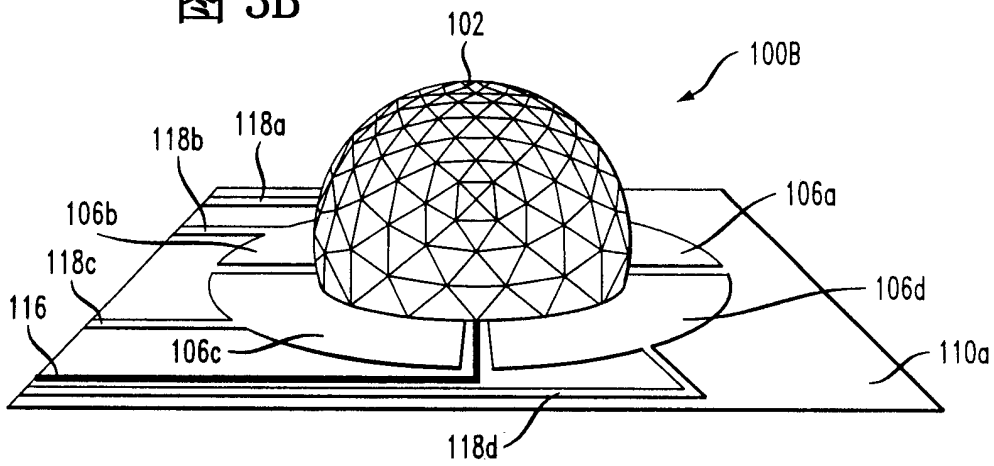


图 3C

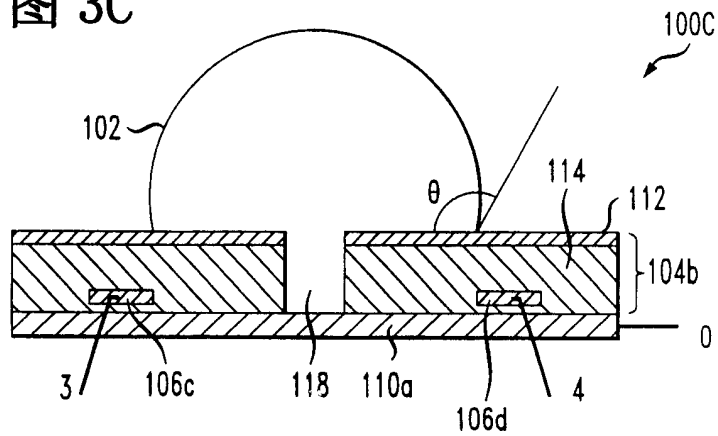


图 4

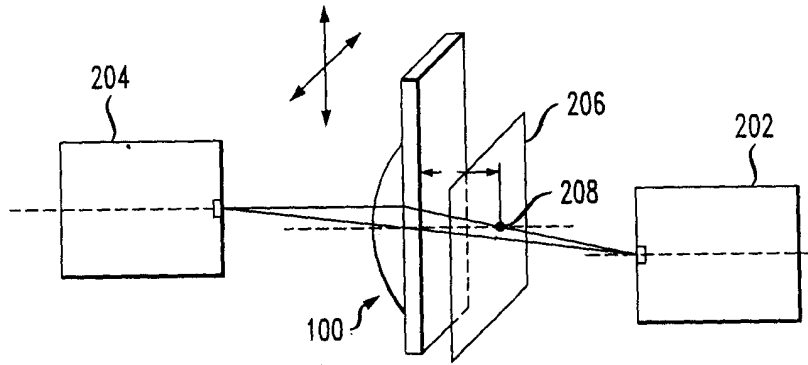


图 5

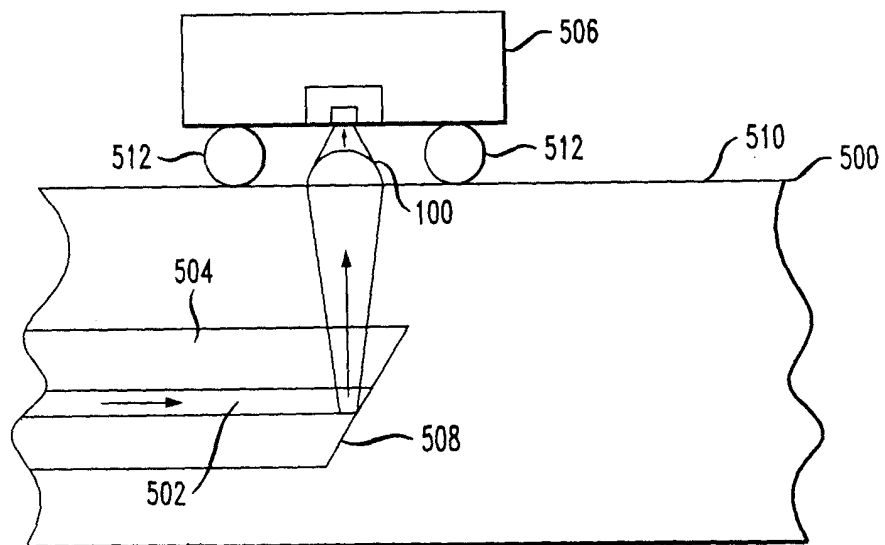


图 8

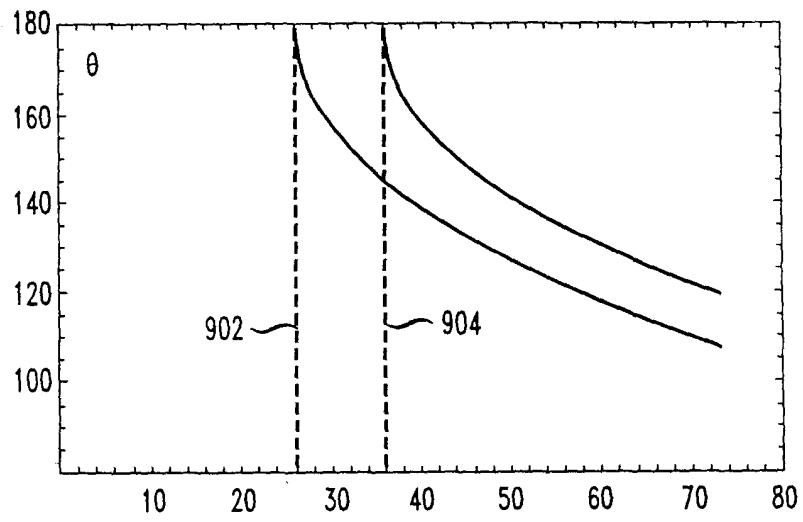


图 6

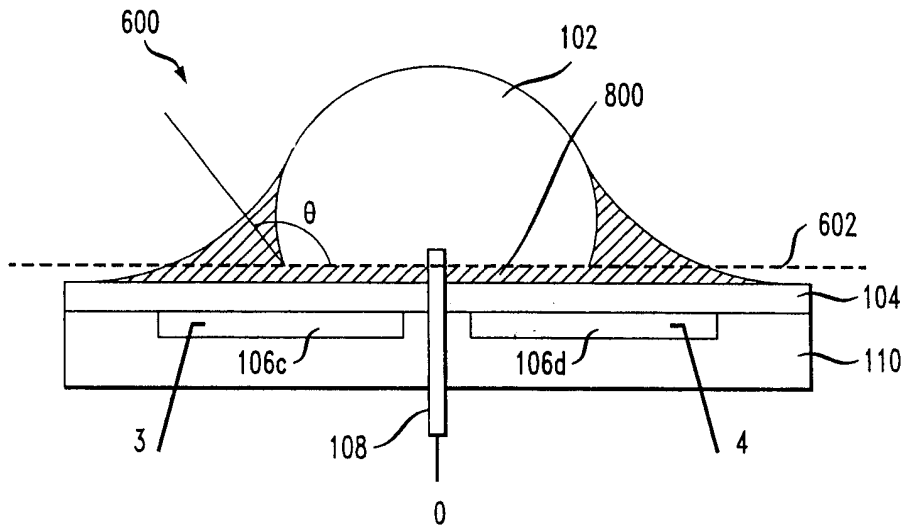


图 7

