

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl.

G02B 5/30 (2006.01)

G02B 6/122 (2006.01)



[12] 发明专利申请公布说明书

[21] 申请号 200680006363.X

[43] 公开日 2008年2月20日

[11] 公开号 CN 101128757A

[22] 申请日 2006.2.3

[21] 申请号 200680006363.X

[30] 优先权

[32] 2005.2.28 [33] US [31] 11/067,848

[86] 国际申请 PCT/US2006/004128 2006.2.3

[87] 国际公布 WO2006/093627 英 2006.9.8

[85] 进入国家阶段日期 2007.8.28

[71] 申请人 3M 创新有限公司

地址 美国明尼苏达州

[72] 发明人 安德鲁·J·欧德科克

奥勒斯特尔·小本森

罗伯特·L·布劳特

帕特里克·R·弗莱明

凯瑟琳·A·莱瑟达尔

特伦斯·D·尼维恩 黛安娜·诺思

[74] 专利代理机构 北京天昊联合知识产权代理有限公司

代理人 丁业平 张天舒

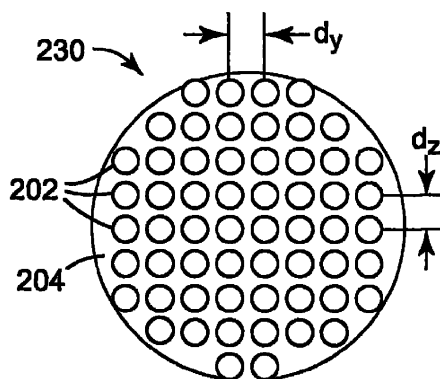
权利要求书 2 页 说明书 30 页 附图 16 页

[54] 发明名称

聚合物光子晶体光纤

[57] 摘要

本发明涉及一种复合聚合物纤维，其包含聚合物填充材料和设置在所述填充材料内的多根聚合物散射纤维。所述填充材料和所述散射纤维中的至少一种由双折射材料形成。对于以第一偏振态入射在所述复合聚合物纤维上的光来说，所述填充材料和所述散射纤维的折射率可以基本上匹配，而对于以正交偏振态入射的光来说，所述填充材料和所述散射纤维的折射率不匹配。所述散射纤维可以排列成使得在所述复合纤维内形成光子晶体。所述复合纤维可以通过挤出而形成，并且可以形成纱、织物等。如果所述填充材料是可溶性的，那么可以从纱或织物中洗掉所述的填充材料，然后，可以用随后固化的树脂来浸渍所述的散射纤维。



1. 一种光子晶体光纤装置，所述光子晶体光纤装置包含：
复合聚合物纤维，所述复合聚合物纤维包含设置在聚合物填料内的聚合物散射纤维，所述聚合物散射纤维的折射率与所述聚合物填料的折射率不同，在所述聚合物纤维的横截面中，所述散射纤维排布成所选的光子晶体排列，以便使横向入射在所述复合聚合物纤维上的光产生所需的光谱效应。
2. 如权利要求 1 所述的装置，其中所述聚合物填料和所述散射纤维中的至少一种包含双折射聚合物材料。
3. 如权利要求 1 所述的装置，其中所述散射纤维的总横截面面积占所述复合纤维横截面面积的约 20%至 95%。
4. 如权利要求 1 所述的装置，其中所述散射纤维的总横截面面积占所述复合纤维横截面面积的约 40%至 90%。
5. 如权利要求 1 所述的装置，其中所述散射纤维的总横截面面积占所述复合纤维横截面面积的约 50%至 90%。
6. 一种光子晶体光纤装置，所述光子晶体光纤装置包含：
聚合物基质；以及
设置在所述聚合物基质内的复合聚合物纤维，所述复合聚合物纤维包含设置在聚合物填料内的聚合物散射纤维，所述聚合物散射纤维的折射率与所述聚合物填料的折射率不同，在至少一根所述复合纤维的横截面中，所述的至少一根复合纤维中的散射纤维排布成所选的光子晶体排列，以便使横向入射在所述的至少一根复合纤维上的光产生所需的光谱效应。

7. 如权利要求 6 所述的装置，其中所述聚合物填料和所述散射纤维中的至少一种包含双折射聚合物材料。

8. 如权利要求 6 所述的装置，该装置还具有光源，所述光源被布置成横向照射所述的至少一根复合纤维。

9. 如权利要求 6 所述的装置，其中所述聚合物基质包含结构化表面。

10. 如权利要求 9 所述的装置，其中所述结构化表面为透过所述结构化表面的光提供光焦度。

11. 如权利要求 9 所述的装置，其中所述结构化表面包含增亮表面结构。

12. 如权利要求 6 所述的装置，其中至少一些所述散射纤维的横截面尺寸为约 50nm 至约 500nm。

聚合物光子晶体光纤

技术领域

本发明涉及聚合物纤维，更具体地说，本发明涉及使用至少一种双折射聚合物材料形成的海岛型聚合物纤维。

背景技术

光子晶体装置具有在多种结构中控制光的潜力。例如，人们已经通过构造具有以特定的图案形式排列的一系列纵孔的玻璃光纤来形成光子晶体光纤，其中所述图案对光沿着光纤的传播提供限制作用。

然而，光子晶体装置迄今尚未大量投入市场。其中的一个原因就是很难制造光子晶体光纤，从而导致这些装置价格昂贵。

发明概述

本发明的一个实施方案涉及一种光子晶体光纤装置，所述光子晶体光纤装置包含复合聚合物纤维，所述复合聚合物纤维具有设置在聚合物填料内的聚合物散射纤维。所述聚合物散射纤维的折射率与所述聚合物填料的折射率不同。在所述聚合物纤维的横截面中，所述散射纤维排布成所选的光子晶体排列，以便使横向入射在所述复合聚合物纤维上的光产生所需的光谱效应。

本发明的另一个实施方案涉及一种光子晶体光纤装置，所述光子晶体光纤装置包含聚合物基质和设置在所述聚合物基质内的复合聚合物纤维。所述复合聚合物纤维包含设置在聚合物填料内的聚合物散射纤维。所述聚合物散射纤维的折射率与所述聚合物填料的折射率不同。在至少一根这种复合纤维的横截面中，所述的至少一根复合纤维中的散射纤维排布成所选的光子晶体排列，以便使横向入射在所述的至少一根复合纤维上的光产生所需的光谱效应。

以上的发明概述无意描述本发明的每个示出的实施方案或者每

种实施方式。下述附图和发明详述更详细地示例出这些实施方案。

附图简要说明

结合附图考虑以下对本发明的多个实施方案所做的详细描述可以更全面地理解本发明，其中：

图 1 示意性地示出根据本发明的包含聚合物纤维的光学元件；

图 2A-2K 示意性地示出根据本发明原理的复合纤维的多种实施方案的剖视图；

图 3A-3I 示意性地示出根据本发明原理的复合纤维的多种额外的实施方案的剖视图；

图 3J-3M 示意性地示出根据本发明原理的复合纤维的更多实施方案的剖视图，所述剖视图示出散射纤维的横截面尺寸沿着所述散射纤维的变化情况；

图 4 是示出光散射效率与散射纤维半径的函数关系的图；

图 5 示意性地示出根据本发明原理的、所含散射纤维具有皮芯结构的复合纤维实施方案；

图 6 示意性地示出根据本发明原理的复合纤维纱的实施方案；

图 7A-7E 示意性地示出根据本发明原理的、包含复合纤维的光学元件实施方案的剖视图；

图 7F-7J 示意性地示出根据本发明原理的、具有结构化表面的光学元件实施方案的剖视图；

图 8A-8D 示意性地示出根据本发明原理的、包含复合纤维的光学元件的制造方法实施方案中的步骤；

图 9 示意性地示出根据本发明原理的、可以用于复合纤维光学元件的制造方法实施方案中的复合纤维束；

图 10 示意性地示出根据本发明原理的、可以用于复合纤维光学元件的制造方法实施方案中的复合纤维织物；

图 11A 和 11B 示意性地示出根据本发明原理的、可以用于复合纤维光学元件中的复合纤维织物的实施方案的剖视图；

图 12A 和 12B 示意性地示出根据本发明原理的、将多根复合纤

维熔结以形成熔结复合纤维光学元件的步骤的实施方案；以及

图 13 是共挤出的复合纤维在拉伸前的横截面照片。

虽然本发明可以有各种修改和替代形式，但是在附图中以实例的形式示出了本发明的细节，并且在下面将进行详细说明。然而，应该理解，其意图并非将本发明限定于所述的具体实施方案。相反，其意图在于包括由所附权利要求书所限定的本发明的精神和范围内的所有修改、等同形式和替代形式。

发明详述

本发明适用于光学系统，更具体地说，本发明适用于控制和使用时偏振光的系统。本发明涉及可以在主要由聚合物材料制备的装置内引入光子晶体结构的产品。聚合物的使用允许一种形成纤维的、由“岛”和“海”构成的排列（有时也被称为“海岛型”结构），其中，“岛”由一种特定类型的聚合物材料形成，“海”由另一种类型的聚合物材料形成。而且，聚合物的使用允许通过共挤出而形成其中“岛”的形状和位置精密受控的“海岛型”纤维。这种对“海岛型”纤维的控制使得二维光子晶体结构的制造相对较为便宜。另外，如果至少一种聚合物材料是双折射性的，则纤维变得对入射光的偏振很敏感。多个二维光子晶体结构可以排列在一起（例如，排列在衬垫中或密封于薄膜内），并且被横向照射，从而，入射光会经历大面积的光子晶体效应，其中所述的光子晶体效应为每根纤维的卷积行为（convoluted behavior）。

使用本发明纤维的装置可被横向照射，而不是沿着纤维的轴被照射，这样可以使得通常认为与光子晶体装置相关的那些限制有所放松。例如，当光子晶体光纤用于纵向导光时，纤维必须要由低损耗的光学材料制备，否则光通量低。另一方面，当光子晶体光纤被横向照射时，由于光程长度相对较短，所以可以使用损耗较高的材料。

在许多应用中，需要相当大的折射率比来表现出二维光子带隙效应，所述的折射率比例如为 1.0 到 2.6 的比值。然而，对入射光的波长范围和角度范围限制得越多，对折射率比的要求就越不严格，从

而可以采用较小的折射率差。然而，使用双折射聚合物材料可以使得针对某一种选择的偏振态而言折射率对比度明显较高，例如，折射率差可在 0.01 至 0.4 的范围内。因此，对于相对较宽范围的入射波长和入射角，可以观察到对某一种偏振态产生光学效应，而没有明显影响其它偏振态。

如本文所用，术语“镜面反射”和“镜面反射性”是指光线从物体反射时其反射角与入射角相等的情况，所述的角是相对于该物体表面的法线测量的。换言之，当光线以特定的角度分布入射到物体上时，其反射光线基本具有相同的角度分布。术语“漫反射”或者“漫反射性”是指一些反射光线的角度与入射光线的角度不相等的这种光线反射情况。因此，当光以特定的角度分布入射到物体上时，反射光的角分布与入射光的角分布不同。术语“全反射性”或者“全反射”是指全部光线的反射，包括镜面反射和漫反射之和的情况。

相类似的是，本文所用的术语“镜面透射”和“镜面透射性”是指光线透过物体的一种透射情况，其中透射光线的角分布基本与入射光线的角分布相同。采用术语“漫透射”和“漫透射性”描述光线透过物体的一种透射情况，其中透射光线的角分布与入射光线的角分布不同。术语“全透射”或者“全透射性”是指全部光线的透射，包括镜面透射和漫透射之和的情况。

图 1 示意性地示出根据本发明的示例性实施方案的光学元件 100 的部分切除视图。光学元件 100 包含聚合物基质 102，其也被称为连续相。所述的聚合物基质可以是光学各向同性的也可以是光学双折射的。例如，所述的聚合物基质可以是单轴双折射的或双轴双折射的，也就是说，聚合物在某一方向上的折射率可以与其它的不同，而在两个正交的方向上折射率相似（单轴双折射），或者在所有三个正交的方向上折射率都不相同（双轴双折射）。复合聚合物纤维 104 被设置在基质 102 内。复合聚合物纤维 104 包含至少两种材料。

聚合物纤维 104 可以以单根纤维的形式（如图所示）或者许多其它的排布形式被布置在基质 102 内。一些示例性的排布形式包括纱、在聚合物基质内沿一个方向排列的丝束（纤维束或纱束）、织物、

非织造织物、短纤维、短纤维毡（具有无规或规则的形式）、或者这些形式的组合。可以对短纤维毡或非织造织物进行拉伸、使其产生应力、或者使其取向，从而使非织造织物或短纤维毡内的纤维在一定程度上对齐，而不是具有由纤维形成的无规的排布形式。

在图 1 中已经采用了右手笛卡尔坐标，并且将纤维 104 设置成与 x 轴大致平行。下面的讨论也假定纤维的纵轴平行于 x 轴，但应该理解的是，这种指定是任意的，并且做这种指定仅仅是为了有助于解释本发明。

在图 2A 中以横截面的形式示出了复合纤维 200 的一个示例性的实施方案。复合纤维 200 包含许多散射纤维 202，散射纤维 202 被包含在填料 204 内。在一些实施方案中，散射纤维 202 或填料 204 中的至少一者为双折射性的。例如，在一些示例性的实施方案中，散射纤维 202 中的至少一些由双折射材料形成，并且填充材料 204 是非双折射性的。在其它的示例性实施方案中，散射纤维 202 是非双折射性的，而填充材料 204 为双折射性的。在其它实施方案中，散射纤维 202 和填料 204 都为双折射性的。在这些不同的变化形式中，每一种位于散射纤维 202 材料和填充材料 204 之间的界面都是双折射材料和另一种材料之间的界面（即，该界面是双折射界面），并且可有助于使所选偏振态的光优选被反射和/或被散射。在这些不同的实施方案中的每一个中，嵌有复合纤维的聚合物基质可以是光学各向同性的或双折射性的。

在一些其它的实施方案中，复合纤维 200 可以由各向同性的散射纤维 202 和各向同性的填充材料 204 构成。其中嵌有复合纤维 200 的基质可以为双折射性的。

散射纤维材料在 x 方向、y 方向和 z 方向上的折射率可以被表示为 n_{1x} 、 n_{1y} 和 n_{1z} ，填充材料在 x 方向、y 方向和 z 方向上的折射率可以被表示为 n_{2x} 、 n_{2y} 和 n_{2z} 。在材料为各向同性的情况下，x 方向、y 方向和 z 方向上的折射率基本上都匹配。在材料为双折射性的情况下，x 方向、y 方向和 z 方向上的折射率中的至少一个与其它的不同。在单轴材料中，上述折射率中的两个基本上匹配，而第三个折射率与

之不同。在双轴材料中，所有这三个方向上的折射率都不同。

在每根复合纤维 200 内有多个位于散射纤维 202 和填料 204 之间的界面。在散射纤维 202 和填料 204 之间的界面所包含的形成材料中的至少一者为双折射性的情况下，这种界面可以被称为双折射界面。例如，如果散射纤维 202 和填料 204 各自在界面处具有 x 折射率和 y 折射率，而且 $n_{1x} \neq n_{1y}$ ，即，散射纤维材料为双折射性的，那么所述界面为双折射性的。

复合纤维 104 通常被设置成与一个轴（如图 1 所示的 x 轴）平行。在复合纤维 104 内，在双折射界面处针对平行于 x 轴偏振的光而言的折射率差 $n_{1x} - n_{2x}$ 可以与针对平行于 y 轴偏振的光而言的折射率差 $n_{1y} - n_{2y}$ 不同。从而，针对某一种偏振态而言，复合纤维 104 中的双折射界面处的折射率差相对较小。在一些示例性的情况中，折射率差可以小于约 0.05，或者可以小于 0.03、小于 0.02 或小于 0.01。这种情况被看作是折射率基本上匹配。如果这一偏振方向平行于 x 轴，那么 x 偏振光就会以很少或没有被反射或散射的状态通过物体 100。换句话说，x 偏振光以高度透射的方式通过物体 100。

另一方面，对于正交偏振态的光而言，复合纤维 104 中的双折射界面处的折射率差可以相对较高。在一些示例性的例子中，折射率差可以为至少约 0.05，并且可以更大，例如为 0.1 或 0.15 或可以为 0.2。如果这一偏振方向平行于 y 轴，那么 y 偏振光在双折射界面处被反射。因此，y 偏振光被物体 100 反射。如果复合纤维 104 内的双折射界面基本上彼此平行，那么所述反射可能基本上是镜面反射。另一方面，如果复合纤维 104 内的双折射界面基本上彼此不平行，那么所述反射可能基本上是漫反射。双折射界面中的一些可以是平行的，并且其它的界面可以是不平行的，从而可以导致既含有镜面反射成分又含有漫反射成分的反射光。此外，双折射界面可以是弯曲的，或相对较小的，从而可以产生漫散射。

虽然上述示例性实施方案涉及 x 方向的折射率匹配、而 y 方向上折射率差相对较大的情况，但是另一些示例性实施方案还包括 y 方向的折射率匹配、而 x 方向上折射率差相对较大的情况。

聚合物基质 102 可以是基本上光学各向同性的，例如，在该聚合物基质的 x 方向和 y 方向上的折射率分别为 n_{3x} 和 n_{3y} 的情况下，其双折射率 $n_{3x}-n_{3y}$ 小于 0.05，优选小于 0.01。在其它的实施方案中，聚合物基质可以为双折射性的。因此，在一些实施方案中，对不同的偏振而言，聚合物基质与复合纤维材料中的一者或两者之间的折射率差可能不同。例如， x 方向上的折射率差 $n_{1x}-n_{3x}$ 与 y 方向上的折射率差 $n_{1y}-n_{3y}$ 可能不同。在一些实施方案中，这些折射率差中的一种可以是其它的折射率差的至少两倍大。

在一些实施方案中，双折射界面的折射率差、大小和形状、以及散射纤维的相对位置可以导致入射光中的一种偏振态比其它的偏振态发生更多的漫散射。这种散射可以主要是后向散射（漫反射）、前向散射（漫透射）、或后向散射和前向散射的组合。

适用于聚合物基质和/或纤维中的材料包括在所需的光波长范围内透明的热塑性聚合物和热固性聚合物。在一些实施方案中，特别有用的是，聚合物不溶于水。另外，合适的聚合物材料可以是无定形的或半结晶性的，并且可以包括均聚物、共聚物、或其共混物。聚合物材料的例子包括（但不限于）：聚碳酸酯（PC）；间同立构和全同立构聚苯乙烯（PS）；C1-C8 烷基苯乙烯；含烷基、芳香基和脂肪族环的(甲基)丙烯酸酯，包括聚甲基丙烯酸甲酯（PMMA）和 PMMA 共聚物；乙氧基化和丙氧基化的(甲基)丙烯酸酯；多官能(甲基)丙烯酸酯；丙烯酸酯环氧树脂；环氧树脂；和其它烯键式不饱和材料；环烯烃和环烯烃共聚物；丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物（ABS）；苯乙烯-丙烯腈共聚物（SAN）；环氧树脂；聚乙烯环己烷；PMMA/聚氟乙烯共混物；聚(苯醚)合金；苯乙烯嵌段共聚物；聚酰亚胺；聚砜；聚氯乙烯；聚二甲基硅氧烷（PDMS）；聚氨酯；不饱和聚酯；聚乙烯，包括低双折射聚乙烯；聚丙烯（PP）；聚对苯二甲酸烷醇酯，例如聚对苯二甲酸乙二醇酯（PET）；聚萘二甲酸烷醇酯，例如聚萘二甲酸乙二醇酯（PEN）；聚酰胺；离聚物；乙酸乙烯酯/聚乙烯共聚物；乙酸纤维素；乙酸丁酸纤维素；含氟聚合物；聚苯乙烯-聚乙烯共聚物；聚碳酸酯/脂肪族 PET 共混物；以及 PET 和 PEN 共聚物，

包括聚烯烃 PET 和 PEN。术语(甲基)丙烯酸酯的定义是对应的甲基丙烯酸酯或者丙烯酸酯化合物。除了间同立构 PS 以外，这些聚合物均可以以光学各向同性的形式使用。

当进行取向后，这些聚合物中的几种可能会变成双折射性的。特别是取向后的 PET、PEN、其共聚物以及液晶聚合物表现出相对较大的双折射值。可以采用不同的方法使聚合物取向，包括挤出和拉伸。拉伸是用于将聚合物取向的特别有用的方法，因为它允许高度取向并且可以通过大量容易控制的外部参数（例如温度和拉伸率）来进行控制。下表 I 中提供了大量取向和未取向的示例性聚合物的折射率。

表 I 一些聚合物材料的典型的折射率值

树脂/共混物	S.R.	T (°C)	n_x	n_y	n_z
PEN	1	-	1.64		
PEN	6	150	1.88	1.57	1.57
PET	1	-	1.57		
PET	6	100	1.69	1.54	1.54
CoPEN	1	-	1.57		
CoPEN	6	135	1.82	1.56	1.56
PMMA	1	-	1.49		
PC、CoPET 共混物	1	-	1.56		
THV	1	-	1.34		
PETG	1	-	1.56		
SAN	1	-	1.56		
PCTG	1	-	1.55		
PS、PMMA 共聚物	1	-	1.55-1.58		
PP	1	-	1.52		
间同立构 PS	6	130	1.57	1.61	1.61

PCTG 和 PETG（乙二醇改性的聚对苯二甲酸乙二醇酯）属于共聚酯类，例如可得自位于美国田纳西州 Kingsport 市的 Eastman Chemical 公司，商标名为 EastarTM。THV 是四氟乙烯、六氟丙烯和

偏二氟乙烯的聚合物，可得自位于美国明尼苏达州 St. Paul 市的 3M 公司，商标名为 Dyneon™。PS/PMMA 共聚物是一种共聚物的实例，可以通过改变共聚物中的构成单体的比率来“调整”该共聚物的折射率，以得到所需的折射率值。标为“S.R.”的一列示出了拉伸率。拉伸率为 1 表示材料未被拉伸，因此也未取向。拉伸率为 6 表示样品被拉伸到原长度的 6 倍。如果在正确的温度条件下拉伸，聚合物分子就会被取向并且所得材料就会变为双折射的。然而，在材料的玻璃化温度 T_g 以上进行拉伸时有可能不会使该材料的分子取向。标为“T”的一列表示拉伸样品时的温度。拉伸后的样品被拉成了片状。标为 n_x 、 n_y 和 n_z 的列表示材料的折射率。在上表中，没有列出 n_y 和 n_z 值的情况表示 n_y 和 n_z 的值与 n_x 的值相同。

期望拉伸纤维时的折射率变化情况与拉伸薄片时的折射率变化情况相近，但并非必须相同。可以将聚合物纤维拉伸到任何需要的拉伸值以得到需要的折射率值。例如，可以对一些聚合物纤维进行拉伸使得拉伸率至少为 3（也可以至少为 6）。在一些实施方案中，可以对聚合物纤维进行更高倍数的拉伸，例如使得拉伸率高达 20，或者甚至更高。

拉伸至产生双折射性时所用的合适的温度是大约为聚合物熔点（单位：开尔文）的 80% 的温度。也可以通过在挤出和成膜过程中由聚合物熔体流动所导致的应力来产生双折射性。也可以通过与相邻表面（例如膜制品中的纤维）对准而产生双折射性。双折射可以为正的也可以为负的。正双折射被定义为这样一种情况，其中，线偏振光的电场轴方向在与聚合物的取向方向或对齐表面平行时折射率达到最大。负双折射被定义为这样一种情况，其中，线偏振光的电场轴方向在与聚合物的取向方向或对齐表面平行时折射率达到最小。正双折射聚合物的实例包括 PEN 和 PET。负双折射聚合物的实例包括间同立构聚苯乙烯。

基质 102 和/或复合纤维 104 可以具有多种添加剂，以便使光学元件具有所需的性能。例如，该添加剂可以包括下述材料中的一种或者多种：抗天候老化剂、UV 吸收剂、受阻胺光稳定剂、抗氧化剂、

分散剂、润滑剂、抗静电剂、颜料或者染料、成核剂、阻燃剂和起泡剂。可以采用其它添加剂以改变聚合物的折射率或者提高材料的强度。这样的添加剂可以包括（例如）：有机添加剂，例如聚合物小珠或颗粒、以及聚合物纳米颗粒；或者无机添加剂，例如玻璃、陶瓷或金属氧化物纳米颗粒，或者磨碎的、粉末状的、珠状的、薄片状的、纤维或微粒状的玻璃、陶瓷或者玻璃陶瓷。这些添加剂的表面可以具有用来与聚合物粘结的粘结剂。例如，可以将硅烷偶联剂与玻璃添加剂结合使用以使玻璃添加剂与聚合物粘结。

在一些实施方案中，可优选的是，基质 102 或填料 204 是不可溶的，或者至少是耐溶剂的。合适的耐溶剂性材料的例子包括聚丙烯、PET 和 PEN。在其它的实施方案中，可优选的是，基质 102 或填料 204 可溶于有机溶剂中。例如，由聚苯乙烯形成的基质 102 或填料 204 可溶于诸如丙酮之类的有机溶剂。在其它的实施方案中，可优选的是，基质是水溶性的。例如，由聚乙酸乙烯酯形成的基质 102 或填料 204 可溶于水中。

在一些光学元件的实施方案中，材料的折射率在 x 方向上可沿着纤维的长度改变。例如，该元件可能没有经历均匀拉伸，而是有可能在某些区域中的拉伸程度要大于在其它区域中的拉伸程度。因此，可取向材料的取向度沿着该元件是不均匀的，所以双折射也会沿着该元件在空间上发生变化。

此外，将纤维引入基质中可以提高光学元件的机械性能。具体而言，一些聚合物材料（例如聚酯）的纤维形式比膜形式具有更高的强度，所以包含纤维的光学元件会比不包含纤维但大小与之相近的光学元件具有更高的强度。而且，由于基质材料和纤维材料的机械性能不同，所以，可以使光学元件的机械性能得以增强。

聚合物材料的不同组合可以用于散射纤维、填充材料和聚合物基质。在一个例子中，散射纤维和填充材料都可以由各向同性材料形成。散射纤维的折射率 n_1 可以大于或小于填充材料的折射率。在另一个例子中，散射纤维可以是各向同性的，并且填充材料可以为双折射性的，例如 $n_{2x} \neq n_{2y}$ 。在这种情况下，散射纤维的折射率值 n_1 可以

同时低于 n_{2x} 和 n_{2y} 、与 n_{2x} 或 n_{2y} 近似相同、介于 n_{2x} 和 n_{2y} 之间、或者同时高于 n_{2x} 和 n_{2y} 。此外， n_{2x} 的值可以大于 n_{2y} 的值，或者， n_{2x} 的值可以小于 n_{2y} 的值。

在另一个例子中，填充材料可以是各向同性的，并且散射纤维可以为双折射性的，例如 $n_{1x} \neq n_{1y}$ 。在这种情况下，填充材料的折射率值 n_2 可以同时低于 n_{1x} 和 n_{1y} 、与 n_{1x} 或 n_{1y} 近似相同、介于 n_{1x} 和 n_{1y} 之间、或者同时高于 n_{1x} 和 n_{1y} 。此外， n_{1x} 的值可以大于 n_{1y} 的值，或者， n_{1x} 的值可以小于 n_{1y} 的值。在另一个例子中，填充材料和散射纤维可以都为双折射性的，例如， $n_{1x} \neq n_{1y}$ 且 $n_{2x} \neq n_{2y}$ 。在这种情况下，填充材料的折射率值 n_{2x} 和 n_{2y} 中的每一个都可以同时低于 n_{1x} 和 n_{1y} 、与 n_{1x} 或 n_{1y} 近似相同、介于 n_{1x} 和 n_{1y} 之间、或者同时高于 n_{1x} 和 n_{1y} 。而且， n_{1x} 的值可以大于或小于 n_{1y} 的值，并且 n_{2x} 的值可以大于或小于 n_{2y} 的值。

可以以多种不同的方式来构造复合纤维。例如，复合纤维可以具有不同的横截面形状。在图 2A 中，复合纤维 200 具有圆形的横截面形状。在图 2B 和图 2C 所示的其它示例性实施方案中，复合纤维 210 和 220 分别具有椭圆形和正方形的横截面形状。也可以采用其它的横截面形状，例如，规则和不规则的多边形形状、或者兼具曲边和直边的横截面形状，并且不应当将本发明局限于如图所示的那些横截面形状。

复合纤维的直径或其它横截面尺寸至少要大到足以包含两根或多根散射纤维的程度。对复合纤维的直径或其它横截面尺寸的上限没有限制，然而，就纤维的可加工性而言，可能会有实际限制。

可任选的是，复合纤维可以具有外层 206。例如，可以使用外层 206 来影响复合纤维和聚合物基质（复合纤维嵌入其中）之间的粘附性。在一些实施方案中，外层 206 可以由这样一种材料形成，该材料会增强复合纤维和聚合物基质之间的粘附性，例如该材料为聚酯树脂涂料、硅烷涂料、或其它用于增强聚合物基质和聚合物纤维之间的粘附性的底漆。在其它的实施方案中，外层 206 可以由这样一种材料形成，该材料会减小聚合物纤维与其周围的聚合物基质之间的粘附性，

例如该材料为碳氟化合物材料、有机硅材料等。在一些实施方案中，外层 206 可以用来提供减反射功能，例如，通过使填料 204 和聚合物基质之间达到某种折射率匹配程度来实现。

散射纤维 202 在复合纤维内的位置可以是无规的，例如，如图 2A-2C 所示的示例性实施方案示意性示出的那样。可以采用其它的散射纤维排列方式。例如，散射纤维 202 可以规则地排列于复合纤维 230 内，例如，如二维光子晶体结构。图 2D 所示的纤维 230 的示例性实施方案表明散射纤维 202 以二维阵列的方式排列，其中，相邻的散射纤维 202 在 y 方向上的间距 d_y 与在 z 方向上的间距 d_z 相同。对于沿着 y 方向和 z 方向入射的光来说，这两种横向入射在所述复合纤维 230 上的光显示出相似的光谱特性。

在图 2E 所示的复合纤维 240 的示例性实施方案中，散射纤维 202 以二维阵列的方式排列，其中，在 y 方向上的间距 d_y 与在 z 方向上的间距 d_z 不同。对于沿着 y 方向和 z 方向入射的光来说，这两种横向入射在所述复合纤维 240 上的光表现出不同的光谱特性。更具体地说， z 间距越大，就越容易导致沿着 z 方向入射的光的最大反射率波长大于沿着 y 方向入射的光的最大反射率波长。

图 2D 和 2E 中的散射纤维 202 位于直角网格图案中，这种直角网格图案应理解为包括图 2D 中的正方形网格图案。相邻散射纤维 202 之间的间距可以为（例如）50nm 到 500nm。

散射纤维 202 的其它规则排列方式也是可以的。例如，在图 2F 中以横截面的形式示意性示出的复合纤维 250 中，散射纤维 202 位于沿着 y 方向的行上，其中，位于相邻行中的纤维在 y 方向上相互偏斜。在这种具体的实施方案中，相邻行之间偏斜使得散射纤维 202 排列成六边形图案的形式、而不是正方形或长方形图案的形式。对于从不同方向横向入射到复合纤维 250 上的光而言，诸如透射和反射之类的光谱特性相对比较均匀。

图 2G 所示的复合纤维 255 示意性地示出了图 2F 所示排列的一种变化形式，其中，最邻近的散射纤维 202 在一个方向上的间隔大于在其它方向上的间隔，在如图所示的具体情况中， z 方向的间隔大于

y 方向的间隔。横向入射在复合纤维 255 上的光的光谱特性不如入射在复合纤维 250 上的光的光谱特性那样均匀。例如，z 方向上的间距越大，反射光谱和透射光谱的光谱特征就越容易向长波方向移动。

在其它示例性的实施方案中，散射纤维 202 可以形成其它图案。例如，可以将散射纤维排列成占据规则阵列中的部分而不是全部位置。此外，可以在相邻的散射纤维或者散射纤维组之间引入空隙或者间隙。可以对所述的组或者空隙和间隙的尺寸和分布加以选择，从而得到特别需要的光谱特性。例如，由散射纤维排布成的某些排列对于特定波长范围内的光可起到二维光子晶体的作用，从而可导致光谱选择性的反射和/或透射。二维光子晶体结构可表现出色移效应，其中，反射和/或透射光谱取决于光入射到复合纤维上的角度。通过控制不同区域的复合纤维的尺寸、分布和折射率，可以控制色移性能。而且，复合纤维允许随着入射角的变化来进一步控制色移性能。例如，可以使色移取决于入射光的方位角（一种与入射光的极角极为不同的方式）。

之前对光子晶体光纤（PCF）所做的研究集中于围绕着光纤芯的散射点（例如纵向的孔）的周期性排列（以便沿着该光纤引导光）的使用上，其中所述的光纤例如为玻璃光纤。光被限制在光纤芯内的这种效果是由光子带隙导致的，其中光子带隙是由光纤内的孔的特定排列而引起的。光纤中的孔的不对称排列使得光纤表现出与偏振相关的波导性能。不过，重要的是，请注意这些与偏振相关的性能并不是由用于光纤中的材料的双折射性而引起的。

本文所公开的复合纤维的类型、以及可由所述复合纤维形成的光学元件的类型不同于这种 PCF 研究中所使用的玻璃光纤。首先，所述复合纤维包含散射纤维，而玻璃 PCF 用孔作为散射点。另外，在一些实施方案中，复合纤维的材料包含至少一种双折射材料，而现有的 PCF 仅仅含有各向同性的材料。

此外，在一些实施方案中，在复合纤维的横截面中散射纤维的密度可以是相对比较均匀的，并且散射纤维位于基本上分布在复合纤维的整个横截面中的位置上。散射纤维的总横截面面积可以占复合纤维

维横截面面积的约 1%至 95%（优选为 10%至 90%、更优选为 10%至 50%）。在整个复合纤维中填充比不必相同。然而，现有的 PCF 中的散射点通常都集中在光纤中心的芯的周围，而大片围绕该光纤芯的区域都没有散射点。因此，对于现有的 PCF 来说，散射点的横截面面积在 PCF 的总横截面面积中仅占较小的比例。

可以使用已知的方法来选择散射纤维在复合纤维内的特定排列方式，以提供与使用该复合纤维的光学元件的反射和透射相应的特定光谱。

现在描述复合纤维的另外一些示例性的实施方案，这些实施方案示出了可能的散射纤维排列方式的部分选择。在图 2H 示意性示出的示例性实施方案复合纤维 260 中，一些散射纤维 202 规则地排列于纤维 260 的中心周围的区域中，但是纤维 260 的中心部分没有散射纤维。在图 2I 示意性示出的另一个例子复合纤维 265 中，散射纤维 202 排列成同心环 206。散射纤维 202 的尺寸以及间隙和/或同心环的尺寸可以根据具体的光学性能（例如，透射和/或反射）来选择。在图 2I 所示的例子中，所示的散射纤维位于由六边形网格确定的位置上。这并非是必要的条件，散射纤维 202 也可以形成径向同心图案，例如如图 2J 示意性示出的那样。

在一些实施方案中，并不是所有的散射纤维 202 都必须具有相同的尺寸。例如，如图 2J 和 2K 所示的实施方案复合纤维 270 和 275 所示，复合纤维可以包含横截面尺寸不同的散射纤维。在这些具体的实施方案中，散射纤维 202a 的横截面相对较大，散射纤维 202b 的横截面相对较小。散射纤维 202 可以被分成至少两个尺寸不同的组，实际上，所有散射纤维 202 的尺寸可以都不相同。此外，散射纤维 202 可以位于复合纤维的中心（例如，如图 2I 中所示），或者复合纤维的中心可以没有散射纤维 202：例如，在图 2J 中，散射纤维 202a 位于复合纤维 270 的周围，而不是位于复合纤维 270 的中心。实际上，散射纤维 202 的尺寸可以落入一个范围内，而不是只取单一的值。

如上面所讨论，复合纤维不必一定为圆形，其可以具有非圆形的横截面。在附图中，图 3A 和图 3B 示出非圆形复合纤维 300 和 310，

复合纤维 300 和 310 分别含有正方形图案和六边形图案的散射纤维 202。上述非圆形纤维可以包含位于构成规则网格图案的点上的散射纤维 202，但不是网格图案上的所有的点都必须与散射纤维 202 相关联。例如，图 3C 示意性示出的非圆形复合纤维 320 包含位于六边形网格上的散射纤维 202，但是在散射纤维之间可以有一些间隙 312。散射纤维 202 的这种特定排列没有对称轴。

图 3D 和 3E 示意性地示出其它示例性的实施方案：非圆形复合纤维 330、340。这些示例性的非圆形复合纤维 330、340 具有正方形的横截面，并且包含排列成不同的示例性图案的散射纤维 202。复合纤维 330 中的散射纤维 202 排列成六边形网格图案，而复合纤维 340 中的散射纤维 202 排列成正方形网格图案。在每一种情况中，在散射纤维 202 的排列内都有间隙。

本发明的范围旨在涵盖散射纤维在复合纤维内的所有的排列形式。在一些示例性的排列形式中，可以设定散射纤维的相对位置、散射纤维的尺寸、以及散射纤维与填充材料之间的折射率差，使得复合纤维具有所需的光谱选择性。这种光谱选择性的实例包括（但不局限于）反射和透射。在复合纤维的一些实施方案中，散射纤维在横截面中的位置可以引起入射光的非相干散射。在另一些实施方案中，散射纤维的位置可以引起散射光的相干效应，从而得到光子晶体特性。散射纤维在复合纤维内的平均密度可以涵盖较大的范围，例如，散射纤维在复合纤维的横截面面积中所占的分数可以在上文所述的范围内，即 1%至 95%，优选为 10%至 90%，更优选为 10%至 50%，但是散射纤维的密度也可以超出这些范围。

散射纤维 202 的尺寸会对散射产生显著的影响。图 4 示出散射效率（归一化的成比例的光学厚度（normalized, scaled optical thickness）（NSOT））与散射纤维平均半径的函数关系曲线。NSOT 值由下式给出：

$$\text{NSOT} = \tau(1-g)/(tf)$$

其中 τ 是光学厚度并且等于 tk ，其中 k 是每单位体积的消光横截面（消光平均自由程的倒数）， t 是散射体的厚度， f 是散射体的体积分数，

g 是非对称参数。对于纯前向散射来说, g 值为+1, 对于纯后向散射来说, g 值为-1, 对于前向散射和后向散射相等的情况来说, g 值为0。用于得到上述曲线的计算假定入射光在真空中的波长为 550nm。

由图可见, 散射效率峰值在半径为大约 150nm 处, 并且在半径为大约 50nm 到 1000nm 的范围处散射效率值大约为最大值的一半。散射纤维可以具有任意所需的横截面尺寸, 但是对于其波长以大约 550nm 为中心的光来说, 横截面尺寸可以在大约 50nm 到大约 2000nm 的范围内, 更为优选的是在大约 100nm 到大约 1000nm 的范围内。当散射纤维具有近似为圆形的横截面时, 其横截面尺寸就是直径, 而对于具有非圆形横截面的散射纤维来说, 可以取该纤维的宽度作为其横截面尺寸。当复合纤维被用于入射光波长在可见光谱范围之外(例如在紫外线区域或者红外线区域)的应用中的时候, 散射纤维的尺寸可能有所不同。通常, 散射纤维横截面尺寸的优选范围为大约 $\lambda/10$ 到大约 4λ , 其中 λ 为光在真空中的波长。当光的波长在某一范围内时, 可以取该波长范围的中间值作为 λ 值, 但是复合纤维也可以设置有具有一定的尺寸范围的散射纤维。

如果散射纤维太细, 例如小于复合纤维内的光波长的的大约 1/30, 或者针对真空中波长为 550nm 的光而言小于大约 $0.012\mu\text{m}$, 并且如果散射纤维的密度足够大, 例如在复合纤维体积的大约 60%-80% 的范围内, 那么这一光学元件可以作为具有有效折射率的介质, 其中沿任意给定轴该有效折射率大致介于散射纤维的折射率和填料的折射率之间。在这种情况下, 几乎没有光被散射。当散射纤维的横截面大小变得比光波长大很多时, 例如当变为波长的至少 3 倍或者更多倍时, 散射效率会变得很低并且会产生彩虹色效应。

散射纤维的横截面尺寸会随着光学材料的所需用途而改变。这样, 例如, 散射纤维的尺寸可随着具体应用中所关注的光波长而改变, 其中, 需要不同的尺寸来散射或者透射可见光、紫外光和红外光。然而, 散射纤维的尺寸通常应当大约高于上述材料中的、所关注的波长范围内的光的最小波长的约 1/30。

就理想的尺寸范围的上限而言, 散射纤维的平均尺寸优选为等

于或者小于上述材料中的、所关注的波长范围内的光的波长的两倍，并且优选为小于所需波长的 0.5 倍。

散射纤维在复合纤维内的密度会影响发生散射的量。散射纤维之间的中心距为约 $\lambda/10$ 至约 2λ 可能是有用的，其中， λ 是入射光在真空中的中值波长或平均波长。

散射纤维的横截面可以是圆形的，但并非必须为圆形的，而是可以具有其它的横截面形状。在图 3F 中以横截面的形式示意性示出的示例性复合纤维 350 中，散射纤维 352 具有正方形的横截面。可以采用其它横截面形状，例如规则和不规则的多边形，例如三角形、长方形或六边形、或者兼具曲边和直边的横截面形状。本发明不应局限于具有附图中所示的这些横截面形状的散射纤维。

当散射纤维之间的中心距不相等时，采用具有非圆形横截面的散射纤维是有用的，因为这样可以使散射纤维在复合纤维的横截面面积中占更高的比例。例如，如果散射纤维排列成长方形网格并且其 y 方向上的中心距是 z 方向上的中心距的两倍，那么如果该散射纤维具有椭圆形的横截面、并且其 y 方向上的长度是 z 方向上的长度的两倍，则与散射纤维为圆形的情况相比，这种椭圆形横截面的散射纤维会在复合纤维的横截面中占据更多的面积。

图 3G-3I 示意性示出具有非圆形横截面的散射纤维的另一些示例性的排列。非圆形散射纤维可以被排布成使得它们的横截面形状沿随机方向排列。在另一些实施方案中，散射纤维的横截面可以相互对齐。例如，图 3G 中，复合纤维 360 由嵌有散射纤维 362 的填料 204 形成，其中散射纤维 362 具有椭圆形的横截面。在这个具体的实施方案中，散射纤维 362 以它们的横截面椭圆的长轴与 y 轴平行的方式对齐。

散射纤维的横截面形状可以通过挤出模具的形状来形成，也可以通过在挤出后对光学元件进行后加工而形成。

散射纤维不必排列成使得它们的横截面都对齐，而是不同的散射纤维可以在复合纤维内具有不同的对齐方式。在图 3H 示意性示出的示例性实施方案复合纤维 370 中，散射纤维 372 具有椭圆形的横截

面，其中一些纤维 372a 被排列成使得它们的长轴与 z 轴平行，而另一些纤维 372b 被排列成使得它们的短轴与 z 轴平行。在上述每一个方向上分别有大约一半的散射纤维 372 是对齐的。此外，纤维 372a 组和纤维 372b 组在复合纤维 370 的横截面内规则排列。可以理解的是，纤维 372a 组和纤维 372b 组也可在复合纤维 370 的横截面内不规则排列。

所示的实施方案可以有另一些变化形式。例如，不是所有的散射纤维都必须具有相同的横截面形状、尺寸或排列方式。此外，可以将散射纤维的横截面对齐以在复合纤维内形成图案。图 3I 示意性地示出这种复合纤维 380 的一个具体实例。填料 204 中嵌入了具有两种不同的横截面形状的散射纤维，即，椭圆形纤维 382 和圆形纤维 384。在所示的实施方案中，椭圆形纤维 382 以这样一种方式排列，该方式为使得它们的横截面椭圆的短轴朝向与之最接近的圆形纤维 384。可以采用其它的散射纤维图案。

当散射纤维可以以不加捻的方式位于复合纤维内，从而使得散射纤维的某一个表面沿散射纤维的长度一直朝向复合纤维的某一个表面。在另一些示例性的实施方案中，散射纤维可以以加捻的方式位于复合纤维内，从而，该散射纤维的某一个表面在沿着该散射纤维长度上的不同部位处会朝向复合纤维的不同表面。

虽然折射率失配是促进复合纤维内与偏振相关的散射的主要依赖因素，但复合纤维的横截面形状也会影响散射。例如，当散射纤维的横截面是椭圆形时，椭圆形的横截面形状可能会造成后向散射光和前向散射光的非对称漫射。该效应可能会增加或者降低由折射率失配而导致的散射量。

此外，在沿着散射纤维的长度方向上该散射纤维的横截面尺寸可以相同，或者在沿着散射纤维的长度方向上的不同位置处该散射纤维的横截面尺寸可以不同。这种变化的例子示意性地示于图 3J-3M 中，图 3J-3M 示出了复合纤维在 x-y 平面上的纵截面视图。在图 3J 所示的实施方案中，复合纤维 400 包含嵌入基质 402 中的散射纤维 404。在该具体实施方案中，散射纤维 404 具有横截面尺寸相对较小

的区域 406 和横截面尺寸相对较大的区域 408。可以通过（例如）在共挤出复合纤维 400 时暂时减小或增大施加于散射纤维聚合物上的压力来产生所述的区域 406、408。

在图 3K 示意性示出的另一实施方案中，复合纤维 410 包括位于基质 412 内的散射纤维 414，其中散射纤维 414 的横截面宽度在一些区域 416 中减小至零。可通过在共挤出过程中更多地减小施加于散射纤维聚合物上的压力来达到这种效果。

并非所有的散射纤维都必须以相同的方式来改变横截面尺寸。例如，图 3L 和图 3M 分别示出与图 3J 和图 3K 所示的横截面相似的横截面，但其中一些散射纤维 404a、414a 的横截面尺寸不变，而另一些散射纤维 404b、414b 的横截面尺寸发生变化。一些散射纤维 404b、414b 的这种变化可以通过（例如）为散射纤维聚合物提供两个与共挤出供料块（feedblock）相连的进料装置来实现。其中一个进料装置受到恒定的压力以形成横截面恒定的散射纤维 404a、414a，而另一个进料装置则受到变化的压力以形成横截面变化的散射纤维 404b、414b。

在一些实施方案中，散射纤维可以具有皮芯结构。图 5 示意性地示出了示例性实施方案复合纤维 500，其包含形成有皮芯结构的散射纤维 502。在这个实施方案中，复合纤维 500 具有外层 506，并且散射纤维 502 嵌入填料 504 内。散射纤维 502 形成有围绕芯 510 的皮层 508。皮层 508 和芯 510 由相同或不同的材料构成。皮层 508 和芯 510 可以由聚合物材料（例如，上文所述的聚合物材料）形成。芯 510 可以是中空的，或者可以被合适的介质所占据，其中，介质可以是固体、液体或气体，并且可以有机的或无机的。芯 510 的横截面形状沿着散射纤维 502 的长度可以是相同的，或者沿着散射纤维 502 的长度可以是变化的。用于芯 510 中的介质的折射率可以考虑到其与皮 508 之间的双折射界面处的折射率差来选择，以便在双折射界面处获得所需程度的反射和散射。上文已经讨论了合适的各向同性的聚合物材料和双折射性的聚合物材料。在一些实施方案中，皮芯型散射纤维 502 可以由这样的皮 508 和芯 510 形成，其中，皮 508 或芯 510 由双

折射材料形成，或者，皮 508 和芯 510 可以都由双折射材料形成。在其它实施方案中，皮 508 和芯 510 可以都由各向同性的材料形成。

皮 508 可用来（例如）影响散射纤维 502 与填料 504 之间的粘附性。在一些实施方案中，皮 508 可以由这样一种材料形成，该材料会增强散射纤维 502 与填料 504 之间的粘附性，例如该材料为聚酯树脂涂料、硅烷涂料、或其它用于增强聚合物基质和聚合物纤维之间的粘附性的底漆。在另一些实施方案中，皮 508 可以由这样一种材料构成，该材料会减小散射纤维 502 与填料 504 之间的粘附性，例如该材料为碳氟化合物材料、有机硅材料等等。在一些实施方案中，皮 508 可用来提供减反射功能，例如，通过使芯 510 与填料 504 之间达到某种折射率匹配程度来实现。

复合纤维可以形成为纱 600 的形式，图 6 示意性示出一个示例性的实施方案。纱 600 可以通过以下方式形成：将取向纤维 602 捻合成纱，然后使用填充材料来填充纤维 602 之间的空隙。在另一个方案中，纱 600 可以通过将各向同性的纤维 602 捻合而形成，其中，所述纤维由可取向的材料制成。然后，可以在形成所述纱后通过（例如）拉伸来对所述纤维进行取向。可以在对纤维 602 材料进行取向之前或之后，将填充材料施加于捻合的纤维 602 之间。在其它的示例性实施方案中，纤维 602 可以由非双折射材料制成，而填料由可取向的材料制成。纱 600 并不局限于仅仅包含由可取向材料制成的纤维，而是也可以包含其它纤维，例如：由其它聚合物材料（各向同性或者双折射性的聚合物材料）制成的纤维；天然纤维，例如棉、丝或麻；以及无机纤维，例如玻璃纤维或玻璃陶瓷纤维。

纱 600 可以包含由玻璃、陶瓷和/或玻璃陶瓷材料构成的纤维或纤维段。玻璃陶瓷材料通常包含 95-98 体积%的极小晶体（其尺寸通常小于 $1\mu\text{m}$ ）。一些玻璃陶瓷材料的晶体尺寸小至 50nm，由于该晶体尺寸远小于可见光的波长，所以，使得该材料可有效地透过可见波长。这些玻璃陶瓷的玻璃态区域和结晶态区域的折射率之间也可以几乎没有或者完全没有有效的差别，这样使得它们看起来是透明的。除了透明性，玻璃陶瓷材料的断裂强度大于玻璃的断裂强度，并且已知

玻璃陶瓷材料的热膨胀系数为 0 或者甚至为负值。所关注的玻璃陶瓷所具有的组成包括(但不限于): $\text{Li}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ 、 $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ 、 $\text{Li}_2\text{O}-\text{MgO}-\text{ZnO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ 和 $\text{ZnO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{ZrO}_2-\text{SiO}_2$ 、 $\text{Li}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ 和 $\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ 。

一些陶瓷也具有足够小的晶体尺寸, 如果将它们嵌入其折射率适当匹配的聚合物基质内, 那么它们看起来会是透明的。可得自位于美国明尼苏达州 St. Paul 市的 3M 公司的 Nextel™ 陶瓷纤维是这种材料的实例, 并且已经可以作为线、纱和织物垫使用。在文献 Chemistry of Glasses 第二版(A. Paul, Chapman and Hall, 1990)和 Introduction to Ceramics 第二版(W. D. Kingery, John Wiley and Sons, 1976)中进一步描述了合适的陶瓷或者玻璃陶瓷材料。

纱 600 可以包含纤维段(通常称为短纤维), 这种纤维不会在纱 600 的整个长度上延伸。在一些实施方案中, 纱 600 可以被密封在聚合物基质内, 并且基质填充了构成纱 600 的纤维 602 之间的空隙。在另一些实施方案中, 纱 600 在纤维 602 之间可以具有填料。

上文已经讨论了用于纱 600 的合适的双折射性聚合物材料。

在其它实施方案中, 可以将两种或多种复合纤维捻合成纱。

本发明所公开的复合纤维可以在聚合物基质内排列成多种不同的方式, 从而形成光学元件。例如, 如图 1 所示, 复合纤维 104 可以在基质 102 的横截面中无规排列。也可以采用其它的排列。例如, 在图 7A (其示出了光学元件 700 的横截面) 示意性示出的示例性实施方案中, 复合纤维 704 在基质 702 内排列成一维阵列, 其中相邻的复合纤维 704 之间具有规则的间隔。在该实施方案的一些变化形式中, 相邻复合纤维 704 之间的间隔不必对所有的纤维 704 来说都是相同的。该图示意性地示出了被光源 706 发出的光 705 横向照射的光学元件 700。部分光 708a 透射通过元件 700, 部分光 708b 被元件 700 漫反射。

通常, 复合聚合物纤维 704 的双折射界面是细长的, 并且在沿着复合纤维 704 的方向上延伸。在包含复合纤维的光学元件的一些示例性实施方案中, 散射纤维 704 与 x 轴平行, 因此漫反射光大部分被

散射到垂直于纤维的平面 (y - z 平面) 中, 在 x - z 平面几乎没有散射。其中包含具有与偏振相关的散射特性的复合纤维的光学元件本身会表现出与偏振相关的特性。例如, 光学元件可以是反射偏振器, 其透射一种偏振态的光, 并且漫反射正交偏振态的光。

在图 7B 中以横截面的形式示意性示出的光学元件的另一个示例性实施方案中, 复合纤维 714 在基质 712 内排列成规则的二维阵列。在所示的实施方案中, 在 y 方向上相邻的复合纤维 714 之间的间距 h_y 与在 z 方向上相邻的复合纤维 714 之间的间距 h_z 相同。但并非必须如此, 如图 7C 示意性示出的那样, 在 z 方向上的间距可以与在 y 方向上的间距不同。另外, 纤维 714 在平行于 z 轴的列上不必对齐, 而是在相邻的列之间可以有所偏移 (例如, 如图 7D 示意性示出的那样), 从而形成六方堆积的纤维图案。也可以采用其它规则的纤维 714 图案。

在另一些实施方案中, 间距可以沿着基质宽度 (即沿着 y 方向) 而变化, 也可以顺着基质的厚度 (即沿着 z 方向) 而变化, 也可以针对沿着 y 方向和 z 方向的不同位置都变化。例如, 在图 7E 示意性示出的实施方案中, 光学元件 715 包含嵌入基质 712 中的复合纤维 714。在该具体实施方案中, 一个区域中的相邻复合纤维 714 之间的中心距减小, 该区域位于该图中部 (相对于两侧的相邻区域而言)。结果, 该区域的填充因子增大, 填充因子也就是复合纤维 714 所占的横截面积分数。填充因子的这种变化可以用于 (例如) 提高由光源 716 发射并透过元件 715 的光的均匀性。例如, 如果元件 715 被包含在由分立光源照射的直视式显示屏内, 那么这可能是重要的。对这种装置来说, 重要的是, 为观看者提供均匀照射的图像。当光源置于均匀漫射器之后时, 透过漫射器的光线在光源的上部亮度最高。图 7E 所示的填充因子的变化可以用于增加光源 716 正上方的漫射量, 从而减小透射光强度的不均匀性。

上述的光学元件可以具有平坦表面, 例如, 如图 1 所示的垂直于 z 轴的光学元件也可以具有一个或者多个结构化表面, 以便使透过光学元件的光或被光学元件反射的光产生所需的光学

效应。例如，在图 7F 示意性示出的一个示例性实施方案中，元件 720（由基质 722 和多根复合纤维 724 形成）可能具有一个或者多个曲面 726。曲面 726 为透过表面 726 的光提供光焦度（聚焦或者散焦）。在所示的实施方案中，射线 728 表示平行于元件 720 的透射轴偏振的光线的例子，该光线通过弯曲的折射表面 726 而聚焦。在这个例子中，弯曲的折射表面 726 是元件 720 的输出表面，被元件 720 透射的光通过该输出表面从元件 720 射出。在其它示例性的实施方案中，元件 720 的输入表面可以具有曲面，光通过该输入表面而进入元件 720。输入表面或输出表面可以包括用于为透过该结构化表面的光提供光焦度的其它结构，例如菲涅尔透镜结构。

除了弯曲区域以外或者为了代替弯曲区域，上述结构化表面也可以包括直线形区域。例如，在另一个如图 7G 示意性示出的示例性实施方案中，由包含复合纤维 734 的基质 732 形成的元件 730 可以具有棱柱形的结构化表面 736，该表面被称为增亮表面。增亮表面通常用于（例如）背光液晶显示器中，以减小照射显示板的光的锥角，从而为观看者增大轴上亮度。图中示出两条离轴光线 738 和 739 作为例子。光线 738 处于被复合纤维 734 透射的偏振态，并由结构化表面 736 转向 z 轴。光线 739 处于被复合纤维 734 漫反射的偏振态。可以将增亮表面设置成使得棱柱结构与纤维 734 平行，并且如图所示也与 x 轴平行。在另一些实施方案中，棱柱结构可以与纤维方向成一定的其它角度。例如，棱柱结构可以形成与 y 轴平行的棱脊、垂直于纤维 734 的棱脊、或者与 x 轴和 y 轴成一定夹角的棱脊。

可以采用任何合适的方法在基质上形成结构化表面。例如，可以在基质表面与诸如微复制工具之类的工具的表面接触时固化该基质，其中该工具表面会在该基质表面上产生所需形状。

散射纤维可存在于光学元件的不同区域中。在图 7G 中，复合纤维 734 并没有位于由结构化表面 736 形成的结构 737 内，而是仅仅位于元件 730 的主体 731 内。在另一些实施方案中，复合纤维 734 的分布方式可能与此不同。例如，在图 7H 示意性示出的光学元件 740 中，复合纤维 734 同时位于元件 740 的主体 731 和由结构化表面 736 形成

的结构 737 内。在图 7I 示意性示出的另一个实例中，复合纤维 734 仅位于元件 750 的结构 737 内，而没有位于元件 750 的主体 731 内。

图 7J 示意性示出本发明的另一个示例性实施方案，其中，元件 760 在基质 762 内具有聚合物纤维 764。在该具体实施方案中，一些纤维 764a 不是完全嵌入基质 762 内，而是穿透基质 762 的表面 766。

在 2005 年 2 月 28 日提交的、标题为“REFLECTIVE POLYRIZERS CONTAINING POLYMER FIBERS”的、共同拥有的美国专利申请 No. 11/068,157（代理人案卷 No. 58959US002）中进一步描述了复合纤维在偏振器元件中的应用。在 2005 年 2 月 28 日提交的、标题为“COMPOSITE POLYMERIC OPTICAL FILMS WITH CO-CONTINUOUS PHASES”的美国专利申请 No. 11/068,159（代理人案卷 No. 60401US002）中也讨论了散射纤维在光学元件中的应用。

在一些示例性的实施方案中，被设置在光学元件内的复合纤维包含大量的多种聚合物材料，包括至少双折射材料和另一种材料（例如，基本上非双折射的材料）。这些不同的材料可以被布置成多种不同的方式，例如，布置成规则的交替层，或者布置成由一种材料置于其它材料的“池”内而形成的细纤维。基质材料可以几乎没有或者完全没有双折射性，或者与此相反可以具有双折射性。例如，如果纤维内的双折射材料表现为 $n_x > n_y$ ，那么基质材料可以表现为 $n_y > n_x$ 。

现在参照图 8A 至图 8D 讨论一种包含本发明复合纤维的光学元件的制造方法。将一根或多根复合纤维 802 置于第一聚合物层 804 上（图 8A），在复合纤维 802 上浇铸第二聚合物层 806 或者形成第二聚合物层 806（图 8B）。第一聚合物层 804 和第二聚合物层 806 可以是相同的聚合物材料，也可以是不同的材料。

纤维 802 可以以单根的形式来铺设，也可以以丝束的形式来铺设，其中丝束是没有捻合的纤维 802 的排列。具体而言，该丝束可以形成复合纤维 802 层，其中，复合纤维 802 层基本上在一个平面内，并且基本上彼此平行。图 9 示意性地示出了纤维束 906。可以存在横向部件 908，以便对聚合物纤维 802 提供支承作用，并使聚合物纤维 802 与其相邻的纤维保持所需的间距。例如，如果以连续工艺将聚合

物纤维 802 铺设在第一聚合物层 804 上，那么就无需采用横向部件 908。

纤维 802 也可以作为织物的一部分而铺设在第一层 804 上。图 10 示意性地示出了织物 1006，其中，复合纤维 802 形成经线，横向纤维 1008 形成纬线。横向纤维 1008 可以由任何合适的纤维材料（有机的或无机的）制成，例如：横向纤维 1008 可以是聚合物纤维，例如，各向同性的纤维或双折射性的纤维；或天然纤维，例如棉、丝和麻。在其它示例性的实施方案中，横向纤维 1008 可以是玻璃纤维（例如，E-玻璃或者 S-玻璃纤维、或其它类型的玻璃纤维。横向纤维 1008 的折射率可以基本上与周围聚合物基质的折射率相匹配，从而减少它们对在光学元件内传播的光产生的光学效应。另外，并不是所有的经线纤维都必须为包含双折射界面的复合纤维 802。例如，一些经线纤维也可以是各向同性的纤维，并且它们可以由与横向纤维类型相同的纤维形成。

可以采用任何合适的织造工艺来形成织物。例如，织物可以为平纹织物（如图所示）、斜纹织物、缎纹织物、或者某种其它织物。在一些示例性实施方案中，织物内的复合纤维 802 相对较平直，例如如图 11A 示意性示出的部分横截面。注意该图符合其中复合纤维 802 基本沿 x 方向排列的约定。在一些示例性实施方案中，复合纤维 802 在织物中仍然保持一个朝向而不加捻。

在另一些实施方案中，织物内的复合纤维 802 不必为平直的。图 11B 示意性示出这种织物 1106 的示例性的部分横截面。重要的是，注意该图所示的视图与图 11A 不同。图 11A 示出横向纤维 1008 的侧面，而图 11B 示出聚合物纤维 802 的侧面。该坐标轴与本发明在以上附图中所用的常规坐标轴是一致的，因此聚合物纤维 802 的设置方向基本与 x 轴平行。但是由于复合纤维 802 在织物 1106 内起伏，所以聚合物纤维 802 的双折射界面不全与 x 轴严格平行设置。相应地，由复合纤维 802 反射或者散射的光可以在 x-z 平面内以不同角度散射。在该附图中，光 1102 沿着垂直于 x 轴的方向入射到纤维 802 上，并且光 1102 的一部分以角度 α 反射，根据光 1102 是入射在聚合物

纤维 802 的“下坡面”还是“上坡面”，其一个分量在正 x 方向或者负 x 方向上。这样，聚合物纤维 802 也可以漫射 x-z 平面内的反射光。x-z 平面内的漫反射光的锥角取决于织物内复合纤维 802 的形状：纤维 802 与 x 方向不平行的部分越多，光在 x-z 平面内的角度分布就越大。

可以用间歇工艺或连续工艺形成光学元件。在连续工艺中，纤维 802 优选以纱、丝束或织物的形式被铺设到第一聚合物层 804 上，然后可以在纤维 802 上连续浇铸或形成第二聚合物层 806。第二聚合物层 806 在浸渍步骤中可以渗入纤维 802 之间。然后，可以固化第二层 806，或使之硬化。

第一聚合物层 804 可以是热塑性聚合物或者热固型聚合物。第二聚合物层 806 和后续的聚合物层 808 也可以是热塑性聚合物或者热固型聚合物。可以通过多种方法将热塑性聚合物施加到上述聚合物层 804 上并使该热塑性聚合物渗入纤维 802 之间，所述方法包括加热和加压、溶剂涂敷和干燥、或者原位聚合。通过受压、受热、经历光化辐射和/或实耗时间，将热固型聚合物涂敷并固化于纤维 802 和上述聚合物层 804 和 806 上。

在制造本发明元件的可供选用的另一方法中，具有一定的所需光学、物理或者表面特性的聚合物膜 804 可被用作其上要铺设纤维 802 的基底。可以施加热塑性或者热固性树脂、或者可固化组合物作为第二聚合物膜 806，以渗入一层或多层纤维 802 之间，然后可施加第二基底 808，以形成包围纤维 802 和由树脂或可固化组合物形成的第二聚合物膜 806 的夹心型结构。然后可以使可固化树脂固化、硬化或者发生反应以形成叠层。在这种情况下，基底 804、808 可以由相同材料（诸如热塑性树脂、热固性树脂或者可固化组合物）制成或者可以由不同材料制成。可以采用多种压敏粘合剂和热熔粘合剂代替热塑性或热固性树脂或者可固化组合物来用于第二层 806。在一些实施方案中，第一基底 804 和第二基底 808 可以紧密粘附于包含纤维 802 的热塑性或热固性树脂或者可固化组合物 806。在另一些实施方案中，第一基底 804 和第二基底 808 可以是可去除的。

如果需要，可以增加附加的复合纤维 802 层以及后续的聚合物材料层 808。例如，图 8C 和图 8D 示出了在第二聚合物层 806 上附加一组复合纤维 802，并且施加第三聚合物层 808。

在另一个用于制造具有多于一层双折射纤维的光学元件的示例性方法中，可以在单一一步中将两层或者更多层纤维铺设在第一聚合物层的上方、然后将第二层聚合物材料浇铸在作为聚合物基质的纤维上。

在另一个用于制造具有复合纤维的偏振器的示例性方法中，可以去除复合纤维中的填料，例如通过在复合纤维被嵌入聚合物基质内以前使填料溶解于溶剂中来实现。然后可以将聚合物基质作为复合纤维中的散射纤维之间的填料。当复合纤维为纱、丝束或织物的形式时该方法特别有用。

制造复合纤维的合适方法包括挤出具有双折射散射纤维和可溶性填料的复合纤维。合适的水溶性填料包括聚乙烯吡咯烷酮、醋酸纤维素和聚乙烯醇。合适的聚乙烯醇包括由聚乙酸乙烯酯水解（水解度为大约 70% 到 95%）而制成的聚乙烯醇。

可以通过挤出来得到阵列形式的散射纤维，通过加热挤出的阵列并施加合适的张力来进行取向，使得散射纤维被拉伸到指定的拉伸率以得到所需的折射率值。

散射纤维取向阵列（形成复合纤维）可以形成为纱。可任选的是，所述的纱中也可以掺有其它种类的纤维。优选的是，通过形成纤维束或者将纤维织造成织物，来使纱朝向一个方向。挤出之后，通过在制造纱的任意阶段清洗纱可以去除可溶性聚合物填料。

清洗后的散射纤维可以被浸入流体（优选的是可固化树脂流体）中。可以采用任何合适的技术来硬化所述树脂，例如可以通过将所述树脂热固化和/或辐射固化而形成包含聚合物纤维的基质。在一些示例性的实施方案中，树脂被固化成使得基质具有平坦的表面。在另一些示例性的实施方案中，树脂可以被固化成使得在一个或者多个表面上具有所需的结构。例如，可以在树脂表面与微复制工具的微结构化表面接触时将树脂固化。合适的微结构化表面的实例包括机械加工的

金属表面、电铸的复制体或者模制的聚合物膜。形成于基质表面的合适微结构的实例包括线性棱柱结构、非线性棱柱结构、菲涅尔表面和微透镜等。

现在参照图 12A 和图 12B 讨论使用复合纤维形成光学元件的另一个方法。图 12A 中示出了多根复合纤维 1201。这些纤维 1201 包含散射纤维 1202 和位于散射纤维 1202 之间的填料 1204。在所示的实施方式中，复合纤维 1201 具有长方形的横截面并且包含排列成特定而规则的横截面图案的散射纤维 1202，其中该特定图案没有对称性。复合纤维 1201 可以采用其它的形状，例如圆形、椭圆形、长方形等等，并且散射纤维 1202 也可以采用其它的横截面排列方式。

将纤维 1201 熔结在一起以形成一个物体 1210，例如，如图 12B 示意性示出的那样。虚线表示熔结以前纤维 1201 之间的边界所在位置。可以用不同的方法将纤维 1201 熔结在一起。例如，可以通过施加压力和/或加热将纤维 1201 熔结在一起。在对纤维 1201 加热的情况中，纤维 1201 的温度不必达到构成纤维 1201 的聚合物材料的熔点，而仅需要达到足以使纤维 1201 彼此粘合的温度即可。例如，该温度可达到介于填料 1204 的玻璃化温度 T_g 以上但在纤维 1201 中的至少一种聚合物成分的熔点以下的某一值。在另一个方案中，纤维 1201 可以涂敷有某种使得纤维 1201 粘合在一起的材料，或者纤维 1201 之间的空隙中渗入了某种使得纤维 1201 粘合在一起的材料。这类材料例如可以为可固化树脂，比如丙烯酸酯。优选的是，粘合材料的折射率接近于复合纤维 1201 中的填充材料的折射率。在另一种方案中，可以用溶剂对复合纤维 1201 进行处理以使得复合纤维 1201 的表面发粘，结果，通过施加压力就会使复合纤维 1201 彼此粘合。

在熔结之前纤维 1201 可以以单根纤维的形式排列，并且在熔结之前它们可以彼此平行排列（如图所示）。在一些方案中，在熔结以前纤维 1201 不必彼此平行排列。在另一些方案中，在熔结以前纤维 1201 可以被设置成纱、丝束或织物的形式。在熔结以前多股丝束或多件织物可以排列成彼此对齐的形式也可以不排列成彼此对齐的形式。可以在熔结以前或以后对复合纤维 1201 进行拉伸以便使其取向而成

为双折射聚合物。

一种制造复合纤维的方法是采用为制造复合纤维而设计的供料块来共挤出多根散射纤维。在纤维科学与技术手册：高技术纤维部分 D（第 3 卷；Lewin 和 Preston（编著），Marcel Dekker，1996，ISBN 0-8247-9470-2）中极为详细地讨论了该方法。也可以采用其它的纤维结构和横截面分布，包括这篇文献中所描述的那些。可以在挤出后对复合纤维进行拉伸，以使双折射材料取向。所述的挤出可以为反应性挤出工艺，例如通常用于环氧树脂的工艺。在另一些方案中，可以挤出单体，随后进行挤出后固化操作。

一些类型的共挤出供料块包含层叠在一起的多块板，其中，所述的板在其一侧或两侧上设置有沟道以及/或者所述的板带有孔，以允许液体聚合物材料从该板的一侧流至另一侧。沟道和孔是这样设计的：当板被层叠在一起时，内部的少量进料口借助于渐增的大量沟道而通往输出侧。排列不同的输出孔，使得在供料块的出料处共挤出物的横截面包含位于所需类型的填充材料“海”中的所需类型的散射纤维聚合物材料“岛”。在 2005 年 2 月 28 日提交的、标题为“COMPOSITE POLYMERIC OPTICAL FILMS WITH CO-CONTINUOUS PHASES”的美国专利申请 No. 11/068,159（代理人案卷 No. 60401US002）中更加详细地描述了适合用于挤出位于复合纤维内的散射纤维的供料块。

例子

在共挤出复合纤维的实例中，装配一种具有 118 片激光加工板和 11 片立铣板的供料块。该供料块具有两个进料口和大约 1000 个“岛”出口。供料块被设计成使得最终得到具有基本上相等的聚合物流的散射纤维。在图 13 的照片中示出了所得的复合纤维形式的共挤出物的横截面。该复合纤维包含 PEN（90%）/PET（10%）共聚物，其作为散射纤维（“岛”）位于 PETG 共聚酯（由位于美国田纳西州 Kingsport 市的 Eastman Chemical 公司提供的 Eastar™ 6763）填料（“海”）中。挤出的复合纤维的直径为大约 200 μm 。该复合纤维

未经历拉伸，但是在保持其几何形状进行拉伸时，其直径可以达到大约 $25\mu\text{m}$ ，即，其直径减小大约 87%。这样拉伸后，散射纤维之间的间距将变为大约 500nm 。散射纤维的横截面尺寸将取决于上述这两种不同聚合物材料的流动速率比。

可以形成包含数千根这种复合纤维的丝束，其中复合纤维大致彼此平行。这些丝束可以按照与参照图 12A 和图 12B 所述方式相似的方式、通过在高温（例如，约 150°C ）下压合而熔合成熔结片。

不应认为本发明只限于上述特定实例，而是应该认为本发明包括如所附权利要求书中明确提出的本发明的所有方面。在阅读本说明书后，对本发明所属领域的技术人员来说显而易见的是，本发明可适用于各种修改、等同处理以及多种结构。权利要求书旨在包括这些修改和设计。

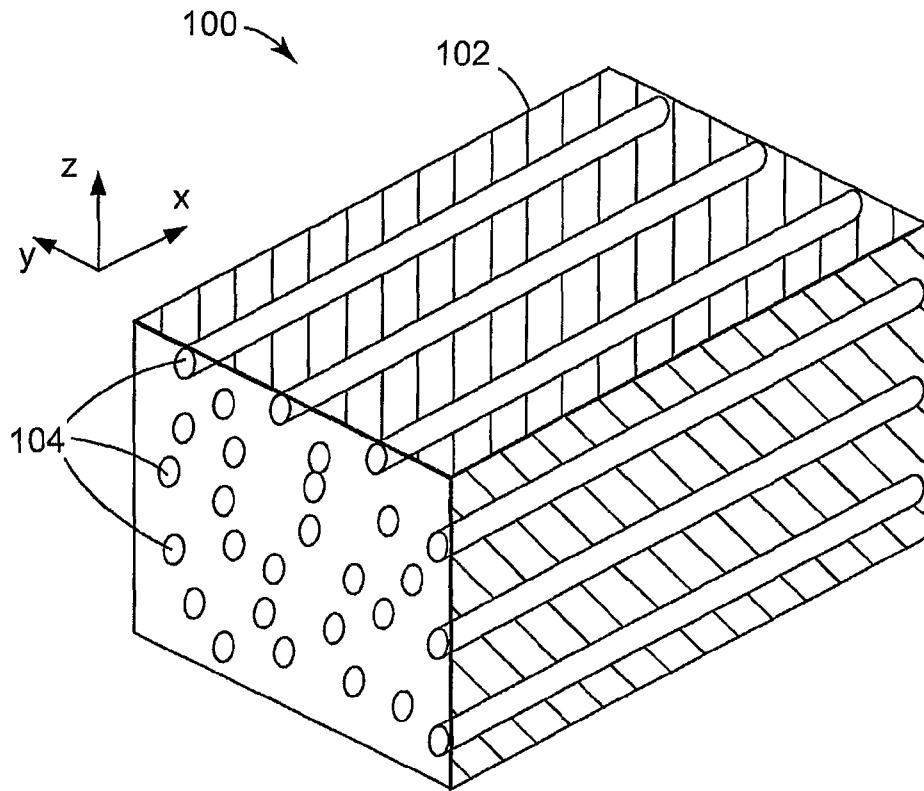


图 1

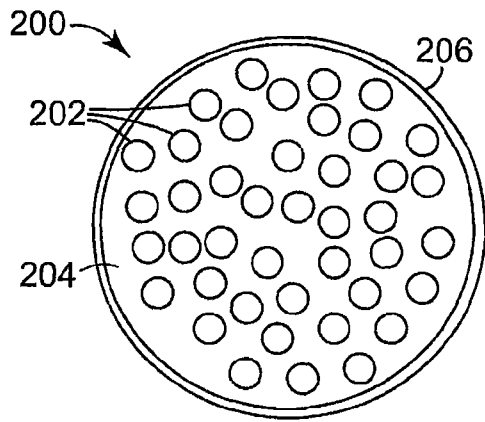


图 2A

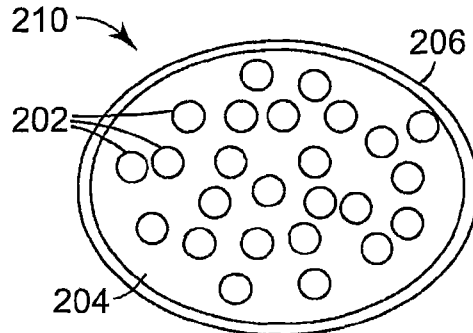


图 2B

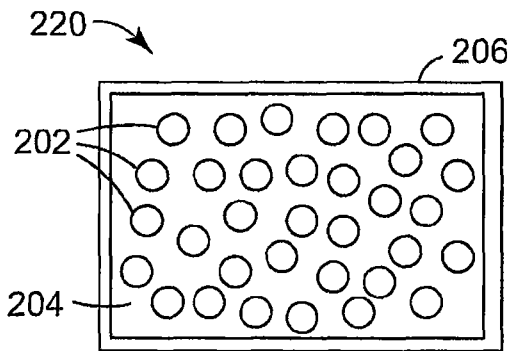


图 2C

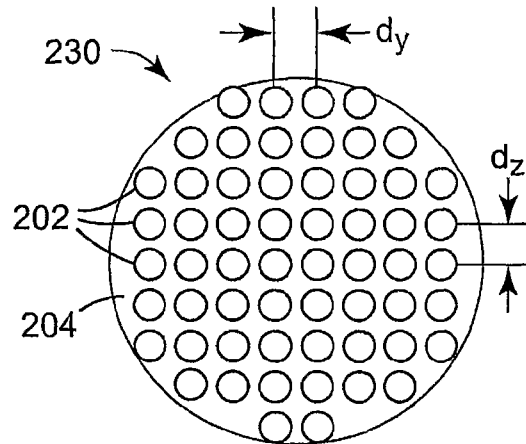


图 2D

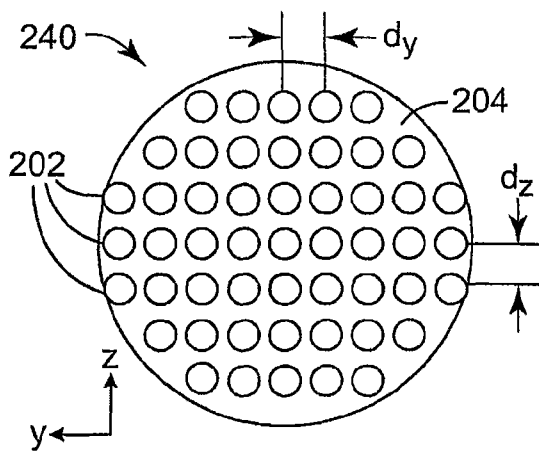


图 2E

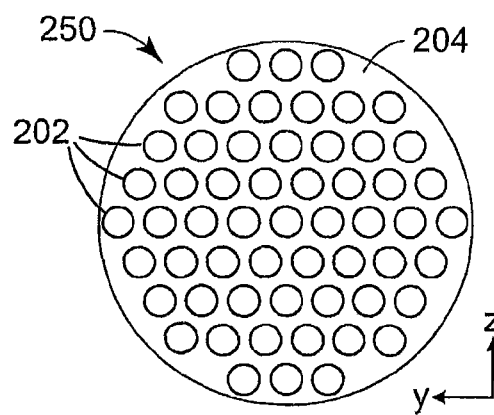


图 2F

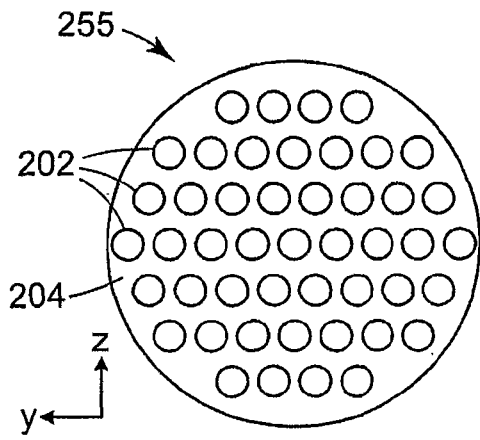


图 2G

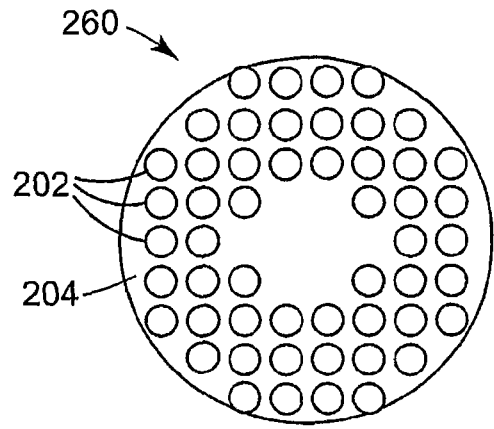


图 2H

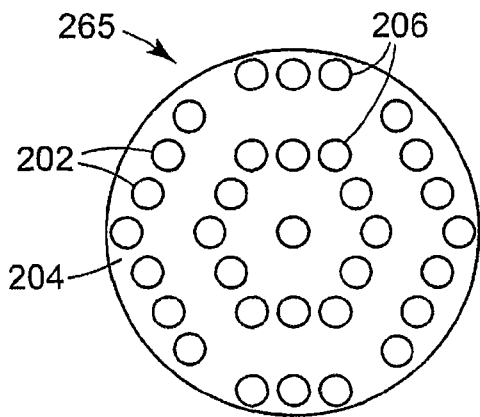


图 2I

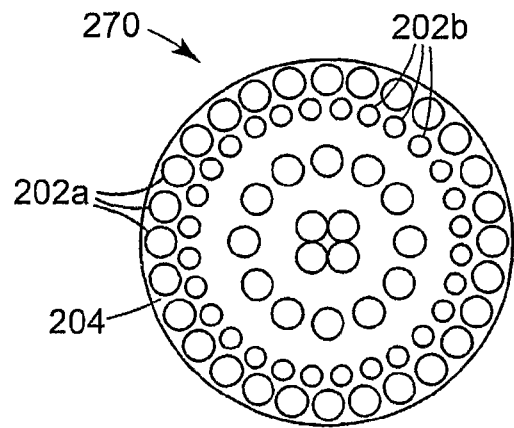


图 2J

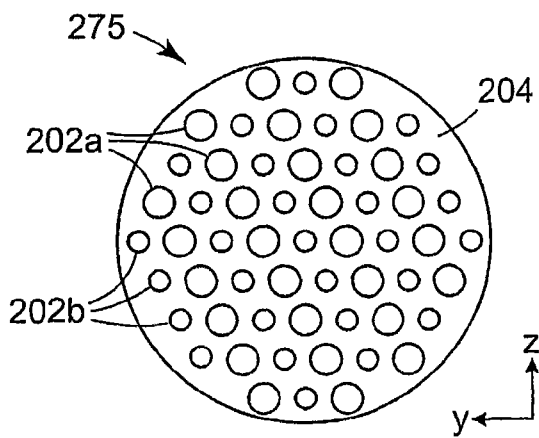


图 2K

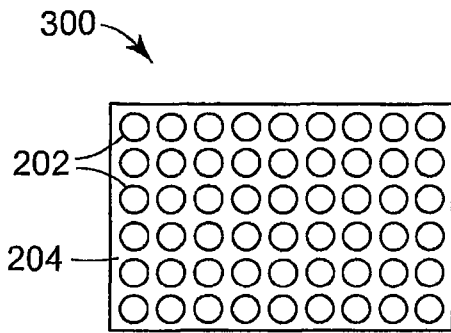


图 3A

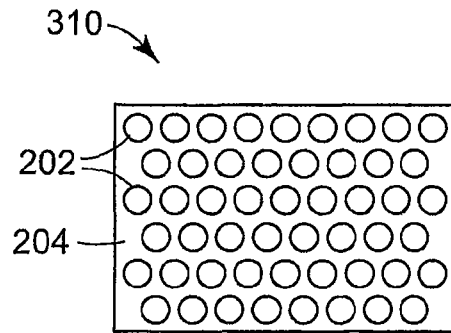


图 3B

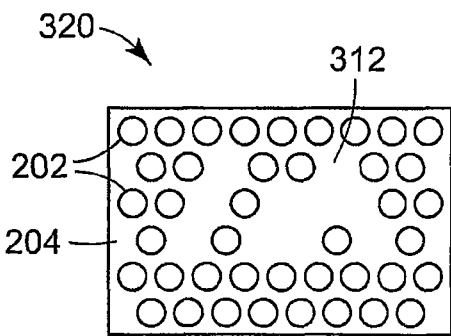


图 3C

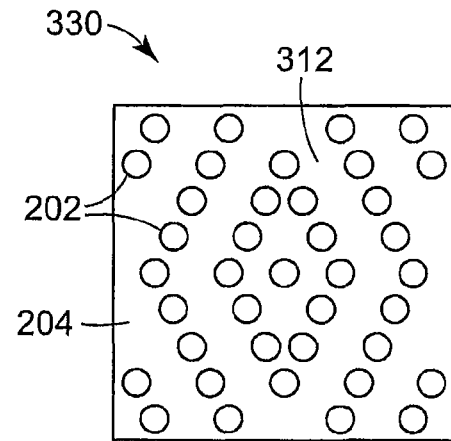


图 3D

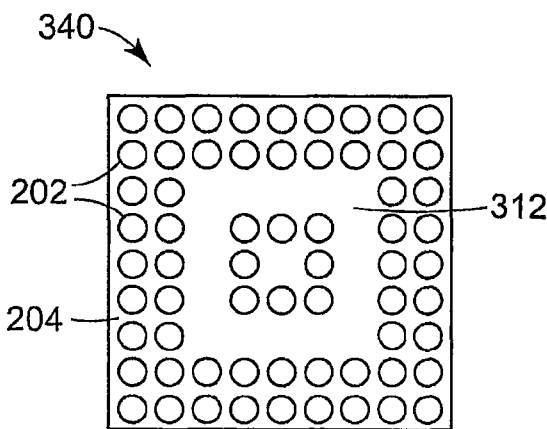


图 3E

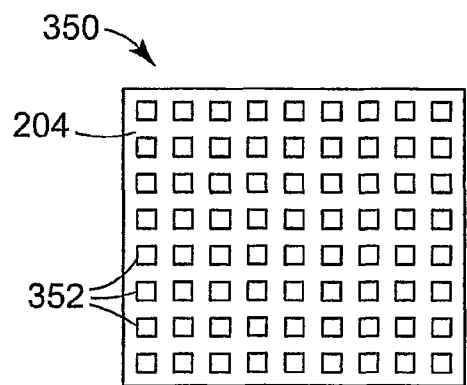


图 3F

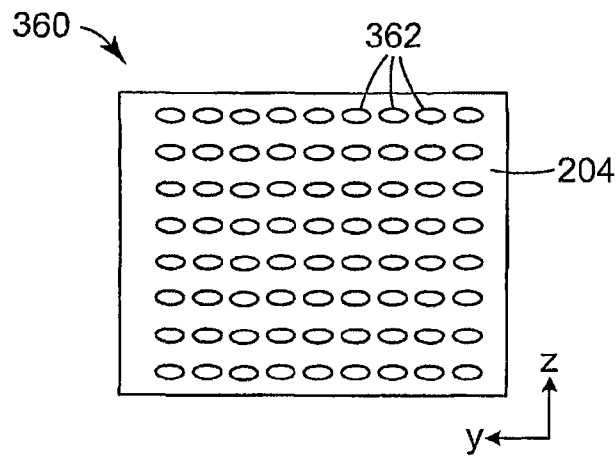


图 3G

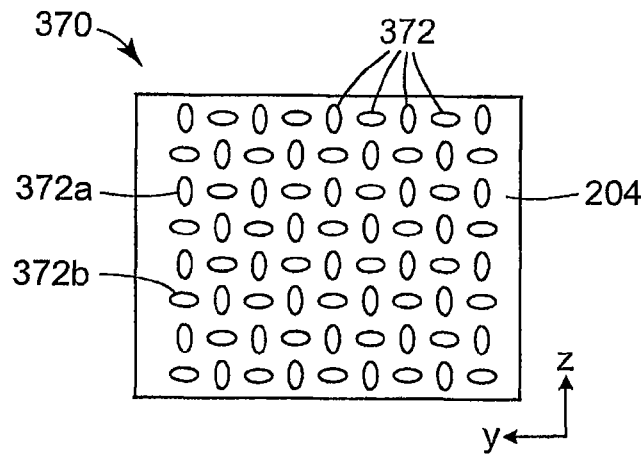


图 3H

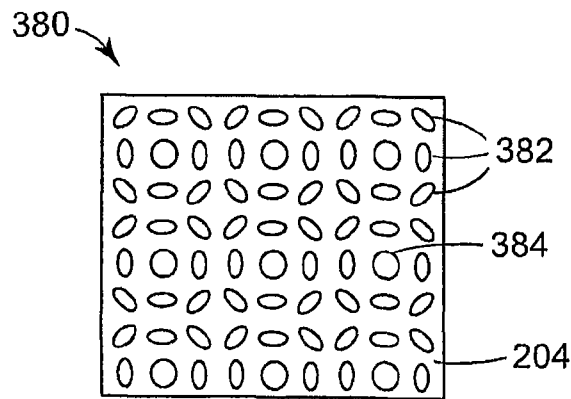


图 3I

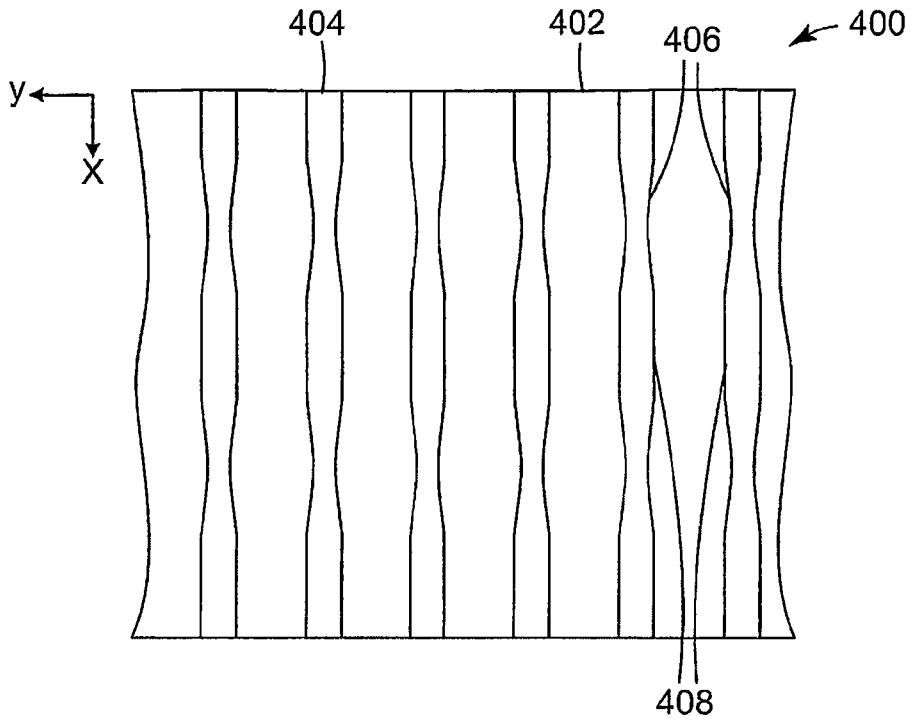


图 3J

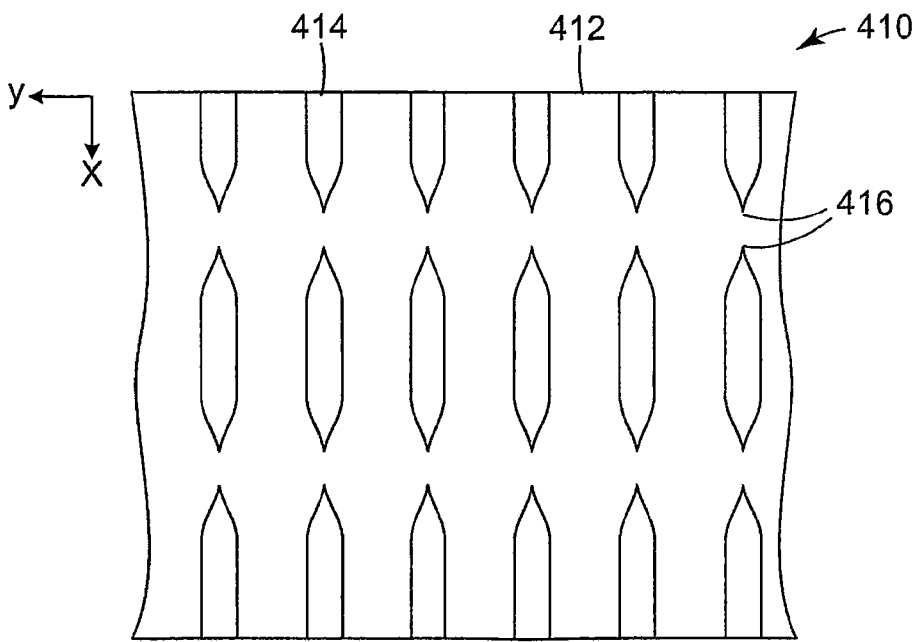


图 3K

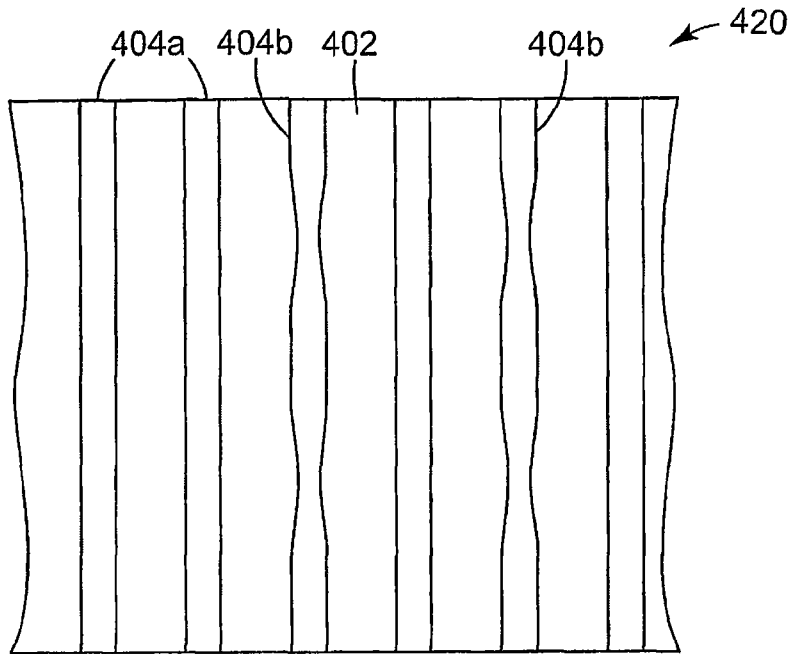


图 3L

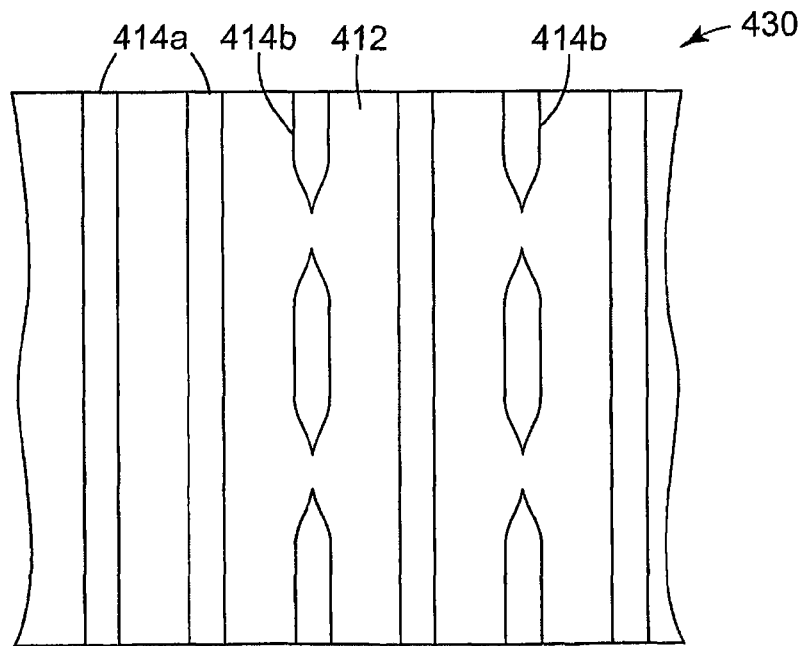


图 3M

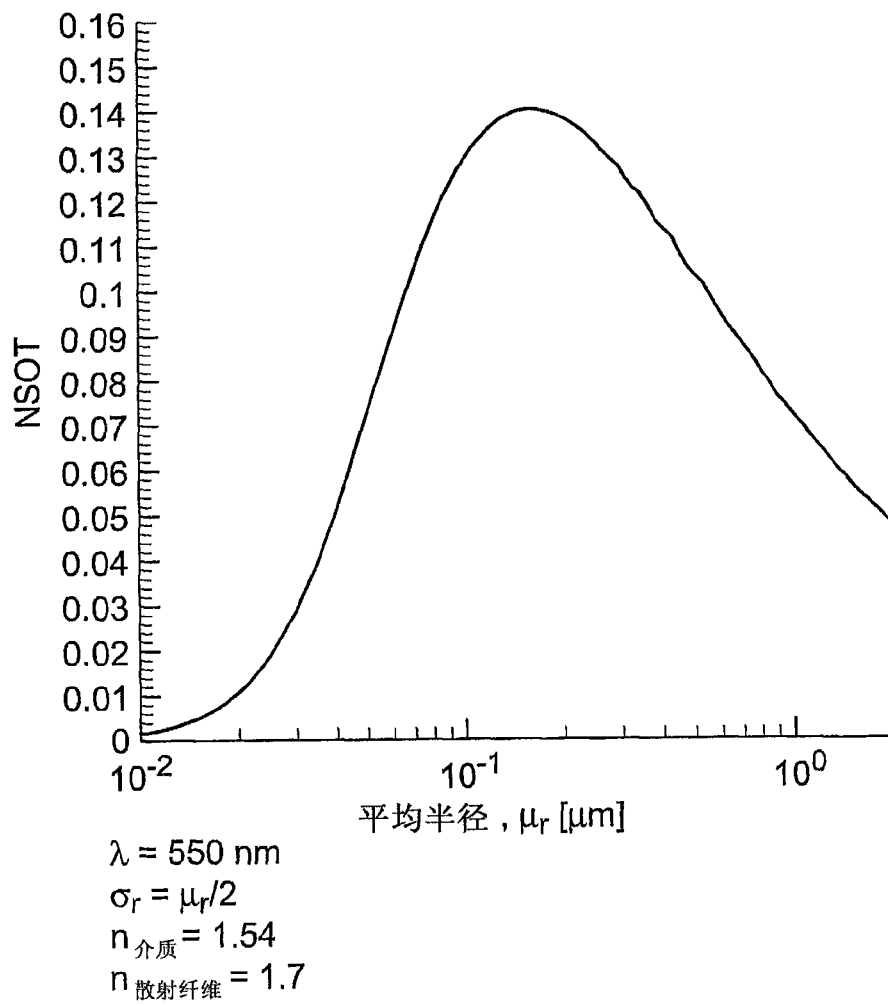


图 4

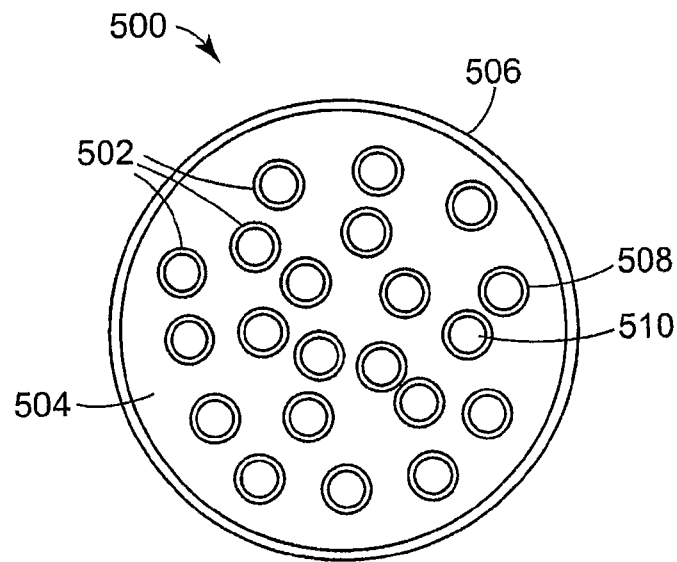


图 5

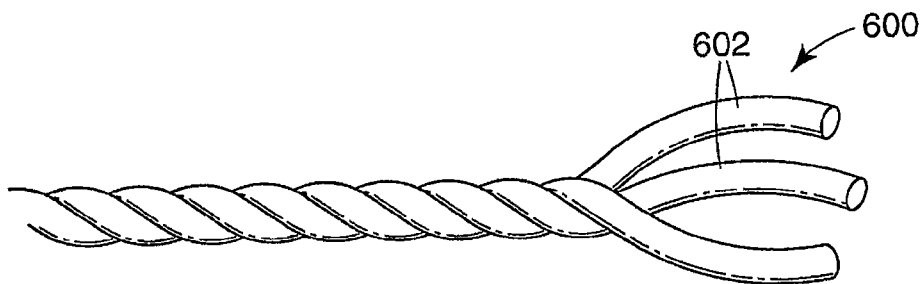


图 6

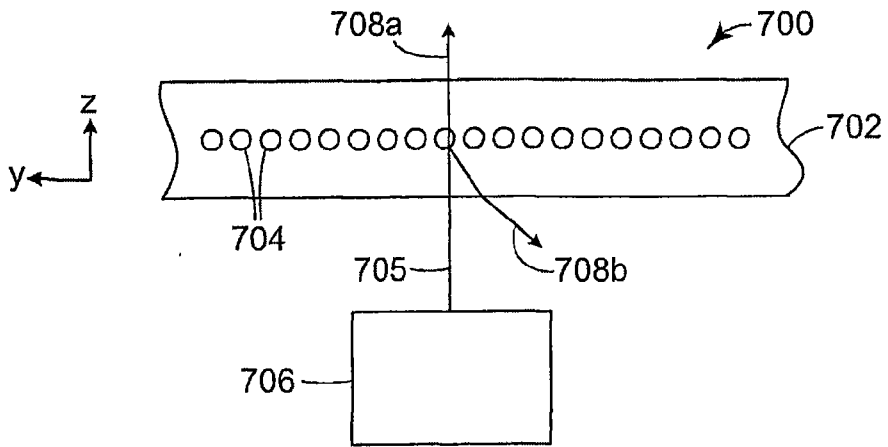


图 7A

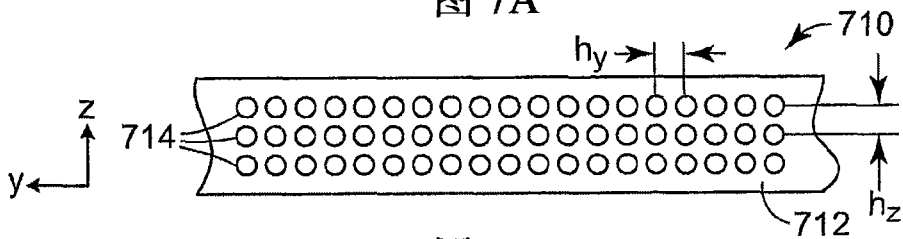


图 7B

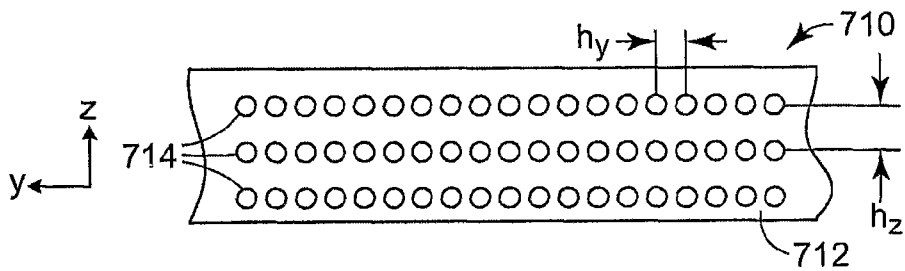


图 7C

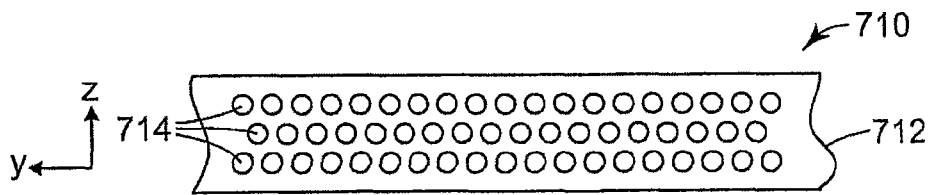


图 7D

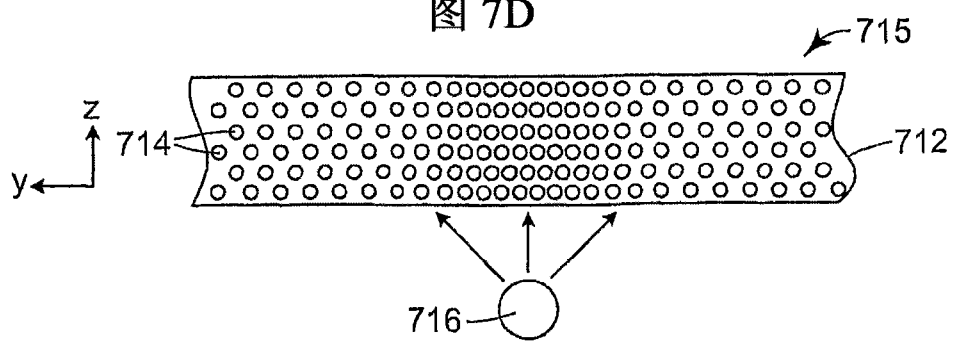


图 7E

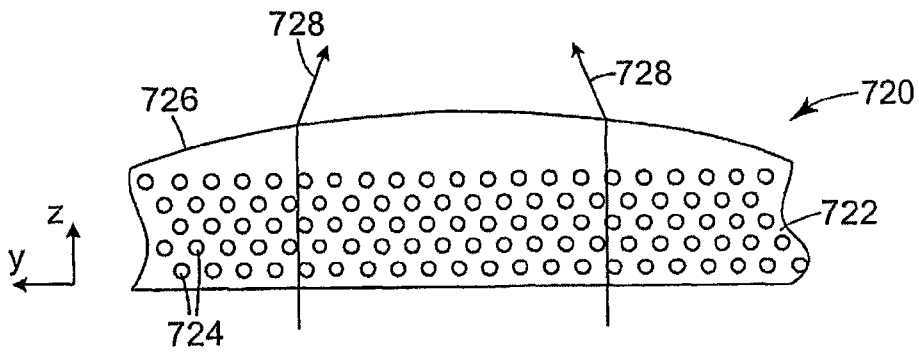


图 7F

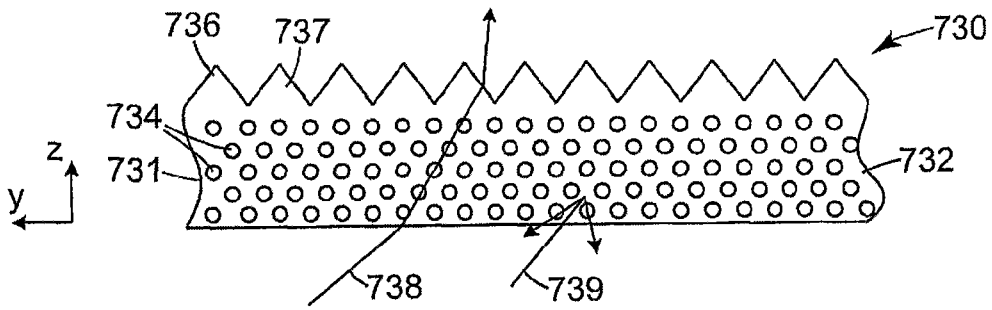


图 7G

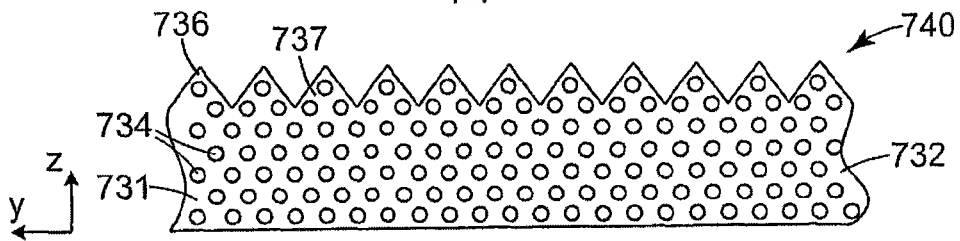


图 7H

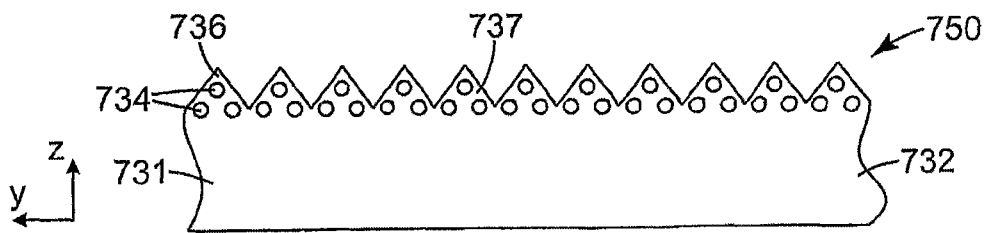


图 7I

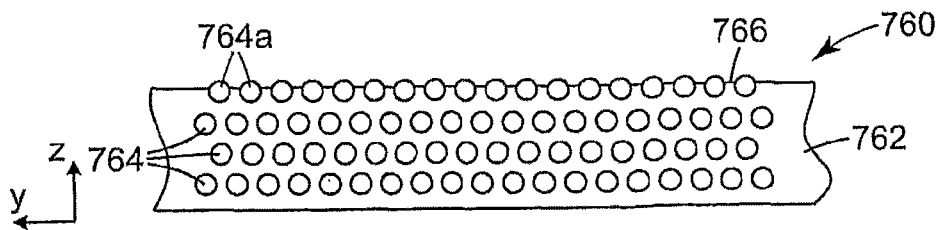


图 7J

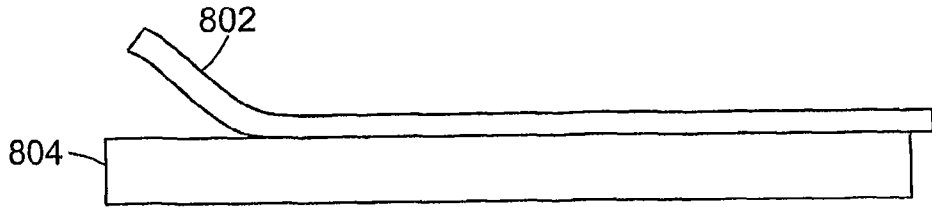


图 8A

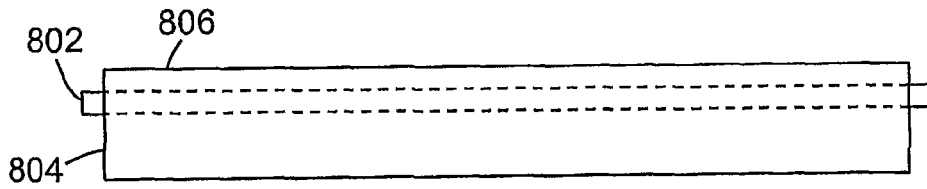


图 8B

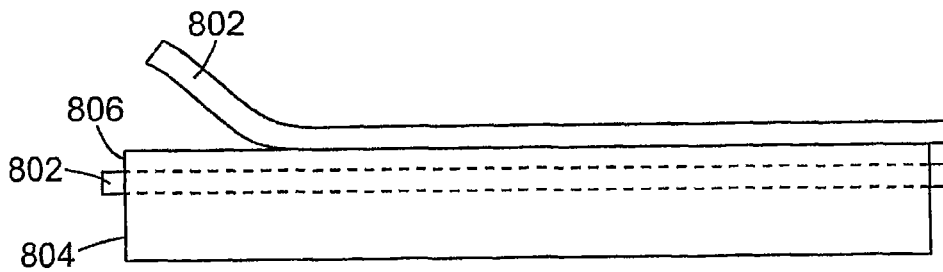


图 8C

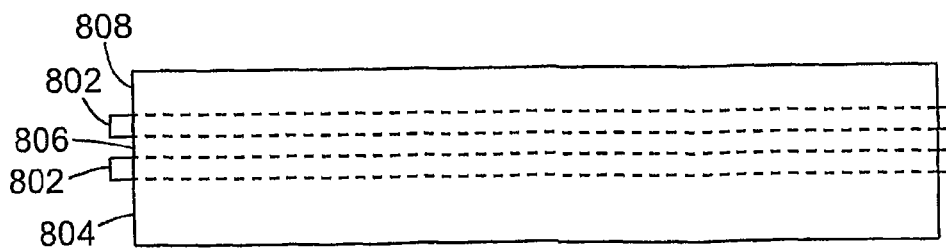


图 8D

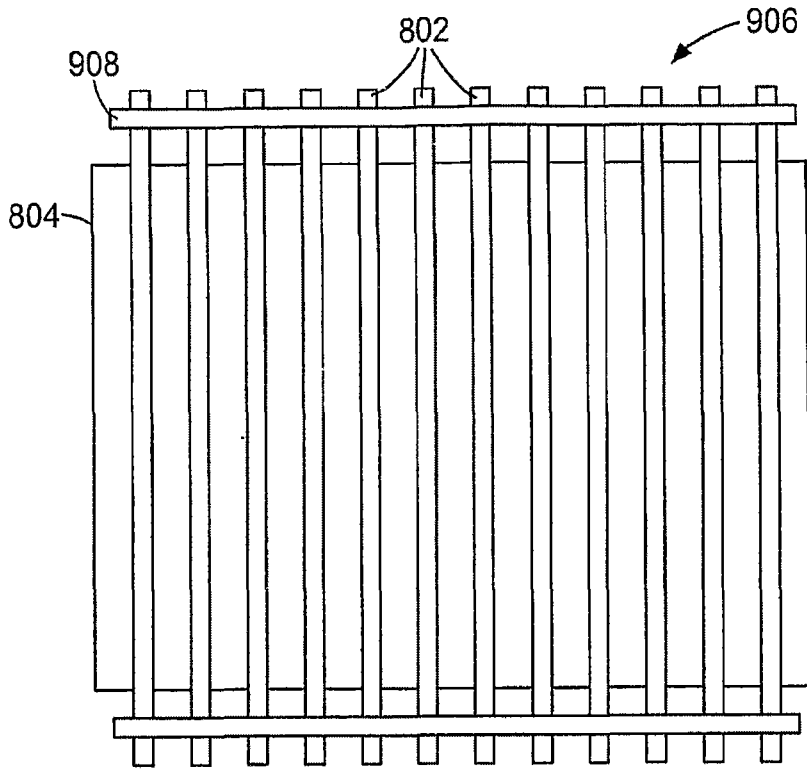


图 9

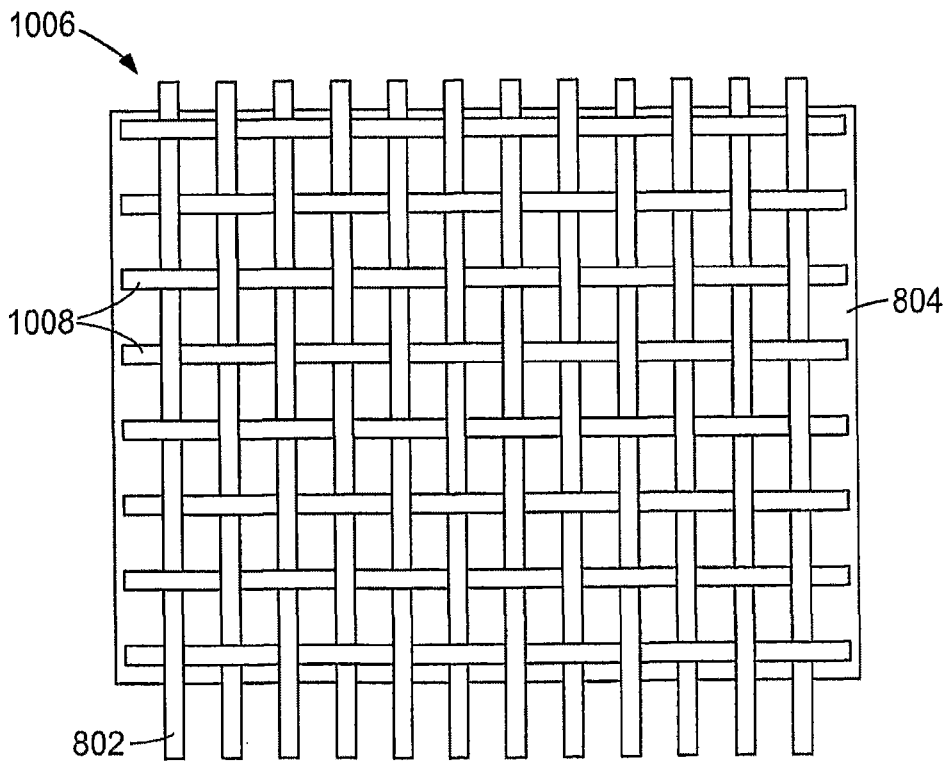


图 10

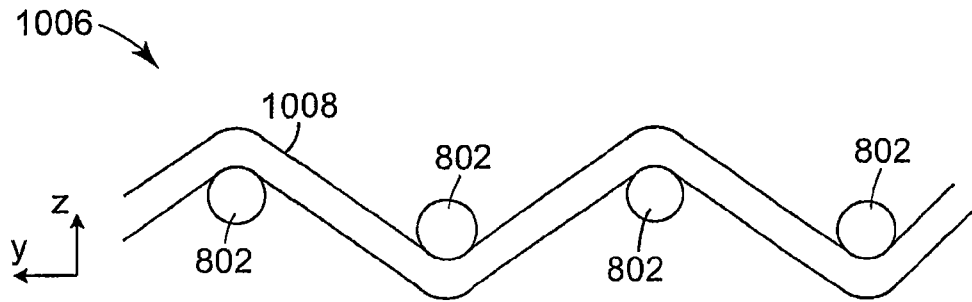


图 11A

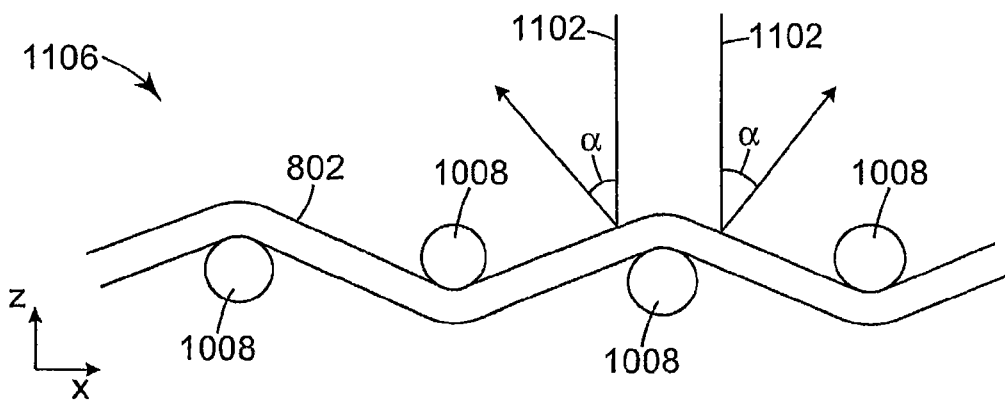


图 11B

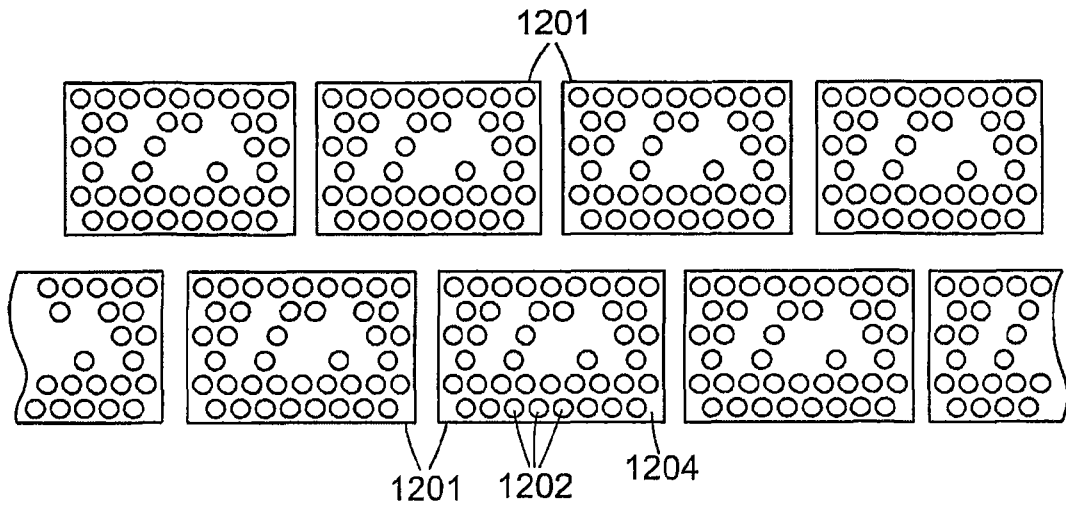


图 12A

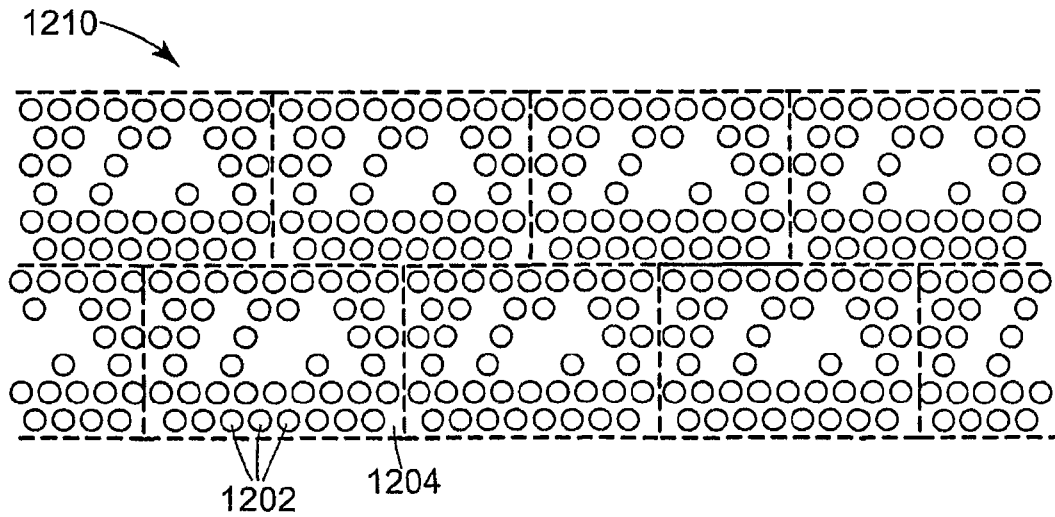


图 12B

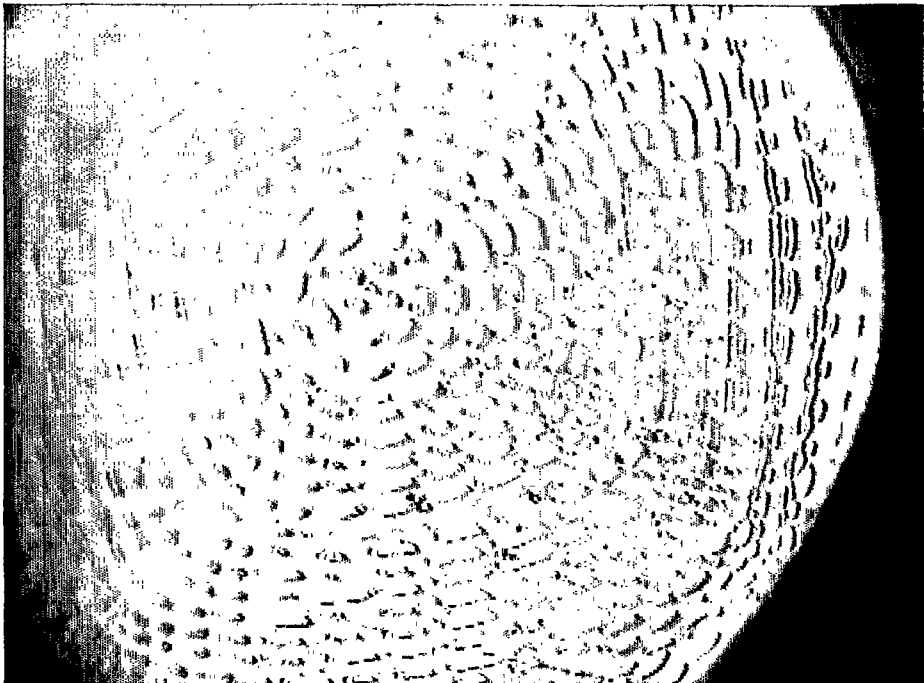


图 13