

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl.

G02B 6/00 (2006.01)

G02F 1/365 (2006.01)



[12] 发明专利申请公开说明书

[21] 申请号 200480001625.4

[43] 公开日 2006 年 4 月 19 日

[11] 公开号 CN 1761894A

[22] 申请日 2004.8.12

[21] 申请号 200480001625.4

[30] 优先权

[32] 2003.8.13 [33] JP [31] 293141/2003

[32] 2004.2.20 [33] JP [31] 045500/2004

[32] 2004.7.9 [33] JP [31] 202954/2004

[32] 2004.7.14 [33] JP [31] 207728/2004

[86] 国际申请 PCT/JP2004/011625 2004.8.12

[87] 国际公布 WO2005/017582 日 2005.2.24

[85] 进入国家阶段日期 2005.6.20

[71] 申请人 日本电信电话株式会社

地址 日本东京都

[72] 发明人 森 淳 加藤正夫 圆佛晃次

青笹真一 及川喜良 栗原隆

藤浦和夫 清水诚 鹿野弘二

[74] 专利代理机构 北京纪凯知识产权代理有限公司

代理人 龙 淳

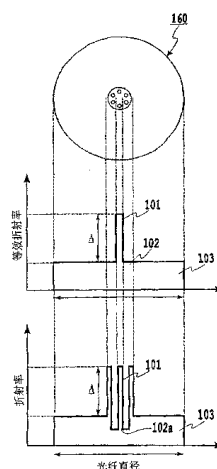
权利要求书 6 页 说明书 45 页 附图 69 页

[54] 发明名称

光纤及其制造方法

[57] 摘要

在使用零材料分散波长为 2 微米以上、非线性灵敏度 $\times^3$ 高到 1×10^{-12} esu 以上、具有可加工为低损耗的光纤的充分的热稳定性的碲化物玻璃的光纤中, 采用了向纤芯区域的封入强的 PCF 构造或 HF 构造。由此, 低损耗地导波光。利用在纤芯区域设置的气孔的大小和形状以及相邻的气孔彼此的间隔, 将零分散波长控制在通信波带 (1.2 ~ 1.7 微米内), 同时具有非线性常数 γ 为 $500 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}$ 以上的大非线性。



1. 一种光纤，传送在光纤通信或光设备中所用的光，其特征在于：
所述光纤的至少纤芯区域由具有 2 微米以上的零材料分散波长的
碲化物玻璃构成，通过在该光纤内配置气孔，使得将光封入该光纤的
5 中心，从而将零分散波长控制在 1.2~1.7 微米频带。

2. 根据权利要求 1 所述的光纤，其特征在于：在光的波长为 λ 、
圆周率为 π 时，在所述光纤的中心设置具有 $\pi \lambda^2$ 的 0.1 倍到 5 倍的面积的区域，
10 通过在除去该区域的该光纤的截面的整个区域上或包围该区域的位置上配置所述气孔，该区域成为封入光的纤芯。

3. 根据权利要求 1 所述的光纤，其特征在于：是具有 2 微米以上的零材料分散波长的碲化物玻璃，具有由 $\text{TeO}_2\text{—Bi}_2\text{O}_3\text{—LO—M}_2\text{O—N}_2\text{O}_3\text{—Q}_2\text{O}_5$ 构成的组成（L 是 Zn、Ba、Mg 中的至少一种以上，M 是 Li、Na、K、Rb、Cs 中的至少一种以上的碱元素、N 是 B、La、Ga、Al、Y 中的至少一种以上，Q 是 P、Nb 中的至少一种以上），其成份
15 为

50<TeO₂<90 （摩尔%）
1<Bi₂O₃<30 （摩尔%）
20 1<LO+M₂O+N₂O₃+Q₂O₅<50 （摩尔%）。

4. 根据权利要求 2 所述的光纤，其特征在于：是具有 2 微米以上的零材料分散波长的碲化物玻璃，具有由 $\text{TeO}_2\text{—Bi}_2\text{O}_3\text{—LO—M}_2\text{O—N}_2\text{O}_3\text{—Q}_2\text{O}_5$ 构成的组成（L 是 Zn、Ba、Mg 中的至少一种以上，M 是 Li、Na、K、Rb、Cs 中的至少一种以上的碱性元素、N 是 B、La、Ga、Al、Y 中的至少一种以上，Q 是 P、Nb 中的至少一种以上），其成份
25 为

50<TeO₂<90 （摩尔%）
1<Bi₂O₃<30 （摩尔%）
30 1<LO+M₂O+N₂O₃+Q₂O₅<50 （摩尔%）。

5. 根据权利要求3所述的光纤，其特征在于：向碲化物材料玻璃添加 Ce^{3+} 、 Pr^{3+} 、 Nd^{3+} 、 Pm^{3+} 、 Sm^{3+} 、 Eu^{3+} 、 Tb^{3+} 、 Dy^{3+} 、 Ho^{3+} 、 Er^{3+} 、 Tm^{3+} 、 Yb^{3+} 内选择的至少一种作为稀土类离子。

5 6. 根据权利要求4所述的光纤，其特征在于：向碲化物材料玻璃添加 Ce^{3+} 、 Pr^{3+} 、 Nd^{3+} 、 Pm^{3+} 、 Sm^{3+} 、 Eu^{3+} 、 Tb^{3+} 、 Dy^{3+} 、 Ho^{3+} 、 Er^{3+} 、 Tm^{3+} 、 Yb^{3+} 内选择的至少一种作为稀土类离子。

10 7. 根据权利要求1所述的光纤，其特征在于：是由碲化物玻璃构成的光纤，包括：纤芯区域；第一包层部，配置为包围所述纤芯区域，在该纤芯区域的周向具有多个沿该纤芯区域的轴方向的气孔；第二包层部，配置为包围所述第一包层部，具有与该第一包层部的等效折射率大致相等的折射率。

15 8. 根据权利要求3所述的光纤，其特征在于：是由碲化物玻璃构成的光纤，包括：纤芯区域；第一包层部，配置为包围所述纤芯区域，在该纤芯区域的周向具有多个沿该纤芯区域的轴方向的气孔；第二包层部，配置为包围所述第一包层部，具有与该第一包层部的等效折射率大致相等的折射率。

20 9. 根据权利要求6所述的光纤，其特征在于：是由碲化物玻璃构成的光纤，包括：纤芯区域；第一包层部，配置为包围所述纤芯区域，在该纤芯区域的周向具有多个沿该纤芯区域的轴方向的气孔；第二包层部，配置为包围所述第一包层部，具有与该第一包层部的等效折射率大致相等的折射率。

25

30 10. 根据权利要求7-9的其中之一所述的光纤，其特征在于：所述第一包层部的所述气孔沿所述纤芯区域的周围方向以一定间隔形成有多个。

11. 根据权利要求7-9的其中之一所述的光纤，其特征在于：所述第一包层部的所述气孔在所述第一包层部的半径方向上形成有多

个。

12. 根据权利要求 7-9 的其中之一所述的光纤，其特征在于：所述第一包层部的所述气孔内部由具有比所述第二包层部的折射率低的折射率的材料来填充。

13. 根据权利要求 7-9 的其中之一所述的光纤，其特征在于：所述纤芯区域的折射率比所述第一包层部的材料的折射率高。

14. 根据权利要求 7-9 的其中之一所述的光纤，其特征在于：所述纤芯区域和所述第一包层部的相对折射率差为 2%以上。

15. 根据权利要求 7-9 的其中之一所述的光纤，其特征在于：向为所述纤芯的中心部嵌入折射率与所述碲化物玻璃的折射率不同的碲化物玻璃。

16. 根据权利要求 2-6 的其中之一所述的光纤，其特征在于：在为所述纤芯区域的中心部设置有气孔。

17. 根据权利要求 2 所述的光纤，其特征在于：将所述气孔配置为三角晶格状、四边晶格状或蜂窝形状的其中任一个形状。

18. 根据权利要求 2 所述的光纤，其特征在于：所述气孔由圆柱、椭圆柱或多角柱的其中任一个形状构成。

19. 根据权利要求 2-6 的其中之一所述的光纤，其特征在于：所述气孔数是 3 个，作为纤芯区域的直径为 0.6~6.5 微米。

20. 根据权利要求 2-6 的其中之一所述的光纤，其特征在于：所述气孔数是 4 个，作为纤芯的区域的直径是 0.6~5 微米。

21. 一种光纤的制造方法，其特征在于，包括：

至少将具有 2 微米以上的零材料分散波长的、具有由 $\text{TeO}_2\text{--Bi}_2\text{O}_3\text{--LO--M}_2\text{O--N}_2\text{O}_3\text{--Q}_2\text{O}_5$ 构成的组成 (L 是 Zn、Ba、Mg 中的至少一种以上, M 是 Li、Na、K、Rb、Cs 中的至少一种以上的碱元素、N 是 B、La、Ga、Al、Y 中的至少一种以上, Q 是 P、Nb 中的至少一种以上)、其成份为

50< TeO_2 <90 (摩尔%)

1< Bi_2O_3 <30 (摩尔%)

1< $\text{LO+M}_2\text{O+N}_2\text{O}_3\text{+Q}_2\text{O}_5$ <50 (摩尔%)

的碲化物玻璃作为纤芯材料, 所述光纤的制造方法包括:

10 第一工序, 向在内壁的内侧形成有多个凸部分的模具注入成型所述碲化物玻璃熔液来制作母材; 和

第二工序, 将由第一工序制作的所述玻璃母材插入由碲化物玻璃构成的圆筒状的套管中, 进行加压拔丝, 使得维持或放大所述玻璃母材和所述套管的间隙的气孔。

15

22. 一种光纤的制造方法, 其特征在于, 包括:

至少将具有 2 微米以上的零材料分散波长的、具有由 $\text{TeO}_2\text{--Bi}_2\text{O}_3\text{--LO--M}_2\text{O--N}_2\text{O}_3\text{--Q}_2\text{O}_5$ 构成的组成 (L 是 Zn、Ba、Mg 中的至少一种以上, M 是 Li、Na、K、Rb、Cs 中的至少一种以上的碱元素、N 是 B、La、Ga、Al、Y 中的至少一种以上, Q 是 P、Nb 中的至少一种以上)、其成份为

20

50< TeO_2 <90 (摩尔%)

1< Bi_2O_3 <30 (摩尔%)

1< $\text{LO+M}_2\text{O+N}_2\text{O}_3\text{+Q}_2\text{O}_5$ <50 (摩尔%)

25 的碲化物玻璃作为纤芯材料, 所述光纤的制造方法包括:

第一工序, 向在内壁的内侧形成了多个凸部分、所述内壁向底部放大加工为圆锥状的模具注入成型所述碲化物玻璃熔液来制作母材;

第二工序, 进一步注入由碲化物玻璃构成的纤芯玻璃的玻璃熔液, 通过包层玻璃的体积收缩来制作将纤芯玻璃吸入成型为圆锥状的玻璃母材; 和

30

第三工序, 将由第二工序制作的所述玻璃母材插入由碲化物玻璃

构成的圆筒状的套管，进行加压拔丝，使得维持或放大所述玻璃母材和所述套管的间隙的气孔。

23. 一种光纤的制造方法，其特征在于，包括：

5 至少将具有 2 微米以上的零材料分散波长的、具有由 $\text{TeO}_2\text{—Bi}_2\text{O}_3\text{—LO—M}_2\text{O—N}_2\text{O}_3\text{—Q}_2\text{O}_5$ 构成的组成（L 是 Zn、Ba、Mg 中的至少一种以上，M 是 Li、Na、K、Rb、Cs 中的至少一种以上的碱性元素、N 是 B、La、Ga、Al、Y 中的至少一种以上，Q 是 P、Nb 中的至少一种以上），其成份为

10 $50 < \text{TeO}_2 < 90$ （摩尔%）

$1 < \text{Bi}_2\text{O}_3 < 30$ （摩尔%）

$1 < \text{LO} + \text{M}_2\text{O} + \text{N}_2\text{O}_3 + \text{Q}_2\text{O}_5 < 50$ （摩尔%）

的碲化物玻璃作为纤芯材料，所述光纤的制造方法包括：

15 第一工序，向在内壁的内侧形成了多个凸部分、所述内壁向底部放大加工为圆锥状、所述底部具有孔的模具注入成型所述碲化物玻璃熔液来制作母材；

 第二工序，进一步注入由碲化物玻璃构成的纤芯玻璃的玻璃熔液，通过包层玻璃的体积收缩和从所述孔流出所述包层玻璃来制作将纤芯玻璃吸入成型为圆锥状的玻璃母材；和

20 第三工序，将由第二工序制作的所述玻璃母材插入由碲化物玻璃构成的圆筒状的套管，进行加压拔丝，使得维持或放大所述玻璃母材和所述套管的间隙的气孔。

24. 根据权利要求 21—23 的其中之一所述的光纤的制造方法，其
25 特征在于：所述模具在内壁的内侧形成 4 个凸的部分，所述光纤的包层有 4 个气孔。

25. 根据权利要求 23 所述的光纤的制造方法，其特征在于：所述
 第二工序从所述孔进行真空抽气，而流出所述包层玻璃。

30

26. 一种光纤的制造方法，其特征在于，包括：

至少将具有 2 微米以上的零材料分散波长的、具有由 $\text{TeO}_2\text{--Bi}_2\text{O}_3\text{--LO--M}_2\text{O--N}_2\text{O}_3\text{--Q}_2\text{O}_5$ 构成的组成 (L 是 Zn、Ba、Mg 中的至少一种以上, M 是 Li、Na、K、Rb、Cs 中的至少一种以上的碱性元素、N 是 B、La、Ga、Al、Y 中的至少一种以上, Q 是 P、Nb 中的至少一种以上), 其成份为

50< TeO_2 <90 (摩尔%)

1< Bi_2O_3 <30 (摩尔%)

1< $\text{LO+M}_2\text{O+N}_2\text{O}_3\text{+Q}_2\text{O}_5$ <50 (摩尔%)

的碲化物玻璃作为纤芯材料, 所述光纤的制造方法包括:

10 第一工序, 向模具注入成型由所述碲化物玻璃构成的玻璃熔液来制作圆柱状的玻璃块体;

第二工序, 在由该第一工序制作的所述玻璃块体的长边方向加工开孔, 制作形成有气孔的玻璃母材; 和

15 第三工序, 将由第二工序制作的所述玻璃母材插入由碲化物玻璃构成的圆筒状的套管, 进行加压拔丝, 使得维持或放大所述气孔。

27、一种光纤的制造方法, 其特征在于, 包括:

至少将具有 2 微米以上的零材料分散波长的、具有由 $\text{TeO}_2\text{--Bi}_2\text{O}_3\text{--LO--M}_2\text{O--N}_2\text{O}_3\text{--Q}_2\text{O}_5$ 构成的组成 (L 是 Zn、Ba、Mg 中的至少一种以上, M 是 Li、Na、K、Rb、Cs 中的至少一种以上的碱性元素、N 是 B、La、Ga、Al、Y 中的至少一种以上, Q 是 P、Nb 中的至少一种以上), 其成份为

50< TeO_2 <90 (摩尔%)

1< Bi_2O_3 <30 (摩尔%)

25 1< $\text{LO+M}_2\text{O+N}_2\text{O}_3\text{+Q}_2\text{O}_5$ <50 (摩尔%)

的碲化物玻璃作为纤芯材料, 所述光纤的制造方法包括:

第一工序, 将由所述碲化物玻璃构成的玻璃熔液注入到底面具有从基台向内侧排列了多个圆柱棒状的销体的钻模的模具中, 通过拔出所述钻模来制作形成有气孔的母材; 和

30 第二工序, 将由第一工序制作的所述玻璃母材插入由碲化物玻璃构成的圆筒状的套管, 进行加压拔丝, 使得维持或放大所述气孔。

光纤及其制造方法

技术领域

5 本发明涉及在通信波段上控制零分散波长的具有高非线性特性的碲化物玻璃（tellurite glass）制的光纤及其制造方法。更详细的，本发明涉及通过设计碲化物玻璃光纤的折射率、构造、材料，而具有作为光通信波段的 1.2~1.7 微米 μm 频带的零分散波长的光纤及其制造方法。

10

背景技术

近年来，因互联网的快速普及引起的爆炸性通信需要的增加和光通信系统的低成本化的要求，研究了光通信系统的大容量化。现有技术中，除了作为大容量化手段研究的时分多路复用传送方式之外，还开发了在一条光纤上多路复用多个不同波长的信号光来传送的波分多路复用（WDM: Wavelength Division Multiplexing）传送方式，正加速

15 度地普及。WDM 传送方式由于可以混合调制方式不同的信号，还可以使用新的波长进行系统的增设，故可以构筑更灵活的光通信系统。

为了更灵活地扩充·高功能化 WDM 传送方式的网络，波长转换元件、高速光开关、超连续光源等的功能性光纤是必不可少的。在这些功能性光纤的开发中，正在积极进行利用了光纤中的非线性光学效应的非线性光纤的研究。

光纤中的非线性光学效应的产生量与非线性光学常数 γ 成正比。非线性光学常数 γ 在有效纤芯截面积 A_{eff} 和非线性折射率 n_2 之间，有 $\gamma \propto n_2/A_{\text{eff}}$ 的关系。因此，为了得到大的非线性，需要使用具有大的非线性折射率 n_2 的光学材料、且要减小 A_{eff} 。这里，由下式提供有效纤芯截面积 A_{eff} （例如，参照非专利文献 1）。

25

$$A_{\text{eff}} = \frac{\left(\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |F(x,y)|^2 dx dy \right)^2}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |F(x,y)|^4 dx dy} \quad [\text{式 1}]$$

现在所报道的使用了石英玻璃的非线性光纤多数为了提高非线性，通过向纤芯添加锗等而提高石英玻璃本身的非线性折射率、或向包层添加氟元素而提高相对折射率差(relative refractive-index difference)而实现了有效纤芯截面积的窄面积化。进一步，在光通信波段中，为了使非线性效应高效发生，必须使光纤的零分散波长为 1.2 微米~1.7 微米，而使其满足相位匹配条件。

但是，在石英光纤的情况下，零材料分散波长大致为 1.2 微米，通过添加物来大大移动其零材料分散波长很困难。因此，提出了通过最佳化光纤的构造参数，使 1.55 微米频带下的波长分散值接近于零的方法（例如，参照非专利文献 2）。

另一方面，报道了现在称为光子晶体光纤（photonic crystal fiber）（下面，简称为 PCF）或中空光纤（holey fiber）（下面，简称为 HF）的，主要使用石英玻璃，在石英玻璃内部的长边方向上特意形成多个气孔（air hole）的光纤（例如，参照非专利文献 3）。

通过使用形成了上述这种气孔的光纤构造，可以提供在具有现有的纤芯·包层构造光纤中不能实现的各种特性，期待向非线性特性高的光纤的应用。

但是，还不能实现零分散波长为 1.2 微米~1.7 微米，且具有高非线性特性的石英系 PCF 或 HF。另外，由于石英玻璃透明性好，但非线性特性并不那么大，所以为了确保非线性光学效应所需的相互作用长度，要加长相互作用长度。例如，是使用了光纤长度达到几百米长条状光纤的情况。因此，期待着通过使用具有更高非线性特性的光学材料，实现更高效且更小型的非线性光设备。

另一方面，近年来，将碲化物 EDFA（Erbium—Doped Fiber Amplifier、铒添加光纤放大器）应用于光通信领域的技术开发正在发展。所谓碲化物是以 TeO_2 为主要成份的碲化物系玻璃。碲化物 EDFA 由在碲化物系玻璃中添加了铒的碲化物制成的铒添加光纤构成，是通过在该光纤内导波几十 m 而放大光的放大器。若使用该碲化物 EDFA，则可以统一放大比可由现有的石英系 EDFA 和氟化物 EDFA 放大的 1.53 微米到 1.56 微米的波带宽两倍以上 1.53 微米到 1.61 微米的波带（参照非专利文献 1）。进一步，通过使用该碲化物 EDFA，可以制造

1.6 微米频带波长下的放大器(参照非专利文献 4)。因此,碲化物 EDFA 作为将来的超大容量 WDM 系统用 EDFA 而引人注目。

如图 1 所示,现有的由碲化物玻璃构成的光放大器用的光纤 4 的截面由中心为圆状的纤芯 1、按同心圆状覆盖其周围的包层 2 与进一步按同心圆状覆盖其周围的套管(jacket 包壳)3 构成。图 2 表示该光纤 4 的折射率分布。这里,若设纤芯 1 的折射率与包层 2 的折射率的差为 $\Delta 1$ 、纤芯 1 的折射率和套管 3 的折射率的差为 $\Delta 3$ 、包层 2 的折射率和套管 3 的折射率的差为 $\Delta 2$,则由于 $\Delta 1$ 比 $\Delta 2$ 稍大,所以将光很强烈地封入纤芯 1 中。

在这种光纤 4 中,通过向纤芯 1 施加添加物等,使纤芯 1 的折射率比包层 2 的折射率充分大。因此,在纤芯 1 和包层 2 的界面上光全反射,光在纤芯 1 中传送。另外,通过使纤芯 1 的折射率和纤芯 1 的直径变化,可以控制某种程度的分散。但是,若增大纤芯 1 的直径,则不满足单模条件,成为了多种模式存在的多模光纤,传送特性恶化了。相反,若减小纤芯 1 的直径,不能得到与其他设备的连接匹配。从如上的原因来看,在现有的由碲化物玻璃构成的光纤中,不能很宽地取分散的控制范围。

但是,由于碲化物玻璃的三次非线性大(参照非专利文献 5),可以期待在脉冲压缩、光参数放大(OPA: Optical Parametric Amplification)、第三谐波生成(THG: Third Harmonic Generation)等中应用碲化物玻璃。另外,碲化物玻璃的材料分散值为零的波长位于比 2 微米长的波段中。

这里,用于光放大器用的高 NA(Numerical Aperture: 开口数(数值孔径))光纤的 1.55 微米频带的波长分散值通常是一 100ps/km/nm 左右的值。因此,在 10m 左右的短条下使用光纤时,波长分散值为 -1ps/nm 左右的大值。

另外,为了长距离使用光纤,或在高速波长多路复用传送下使用,需要该光纤的波长分散值尽可能接近于零。但是,如上所述,由碲化物玻璃构成的光纤的零分散的波长是 2 微米以上的波段,因此,即使使用在石英光纤中所用的公知的由结构分散形成的最佳化方法,在由碲化物玻璃构成的光纤中,1.55 微米频带下波长分散值也不为 0。

因此，利用碲化物玻璃具有的高非线性特性，在当前的光纤通信波段中实现上述应用是困难的。

前述的 PCF（或 HF）根据导波原理分为两类。其中一种是通过光子带隙（photonic band gap）封入光的光子带隙型 PCF。该 PCF 为具有
5 周期性的气孔配置和均匀的气孔大小的结构。另一种是通过从具有气孔的媒质的实际折射率得到的全反射来封入光的折射率导波型 PCF。该折射率导波型 PCF 为不必须具有周期性的气孔配置和均匀的气孔大小的构造。

在这种 PCF 或 HF 中，与现有的光纤相比，折射率差可以增大一个数量级以上，可以得到大的结构分散。通过该结构分散，在由石英构成的 PCF 或 HF 中，零分散波长向短波长侧移动。M.J.Gander 他们在非专利文献 6 中，通过试验测量具有没设置气孔的纤芯部分和按六边形排列气孔的包层部分的由石英玻璃构成的光纤的分散特性，公开了其结果。根据该文献，813nm 频带的分散值约为 -77ps/km/nm 。Birks
10 他们在非专利文献 7 中，公开了在由单一材料构成的光纤中，算出 PCF 的分散，而倡导 PCF 的分散补偿的效果。这样，PCF 构造或 HF 构成作为使用了碲化物玻璃的光纤的分散补偿方法之一而令人期待。

N.G.R.Broderick 他们在专利文献 1 中，公开了使用多成份玻璃，来形成 PCF 构造或 HF 构造的光纤。根据该文献，作为多成份玻璃的例子，有碲化物玻璃的描述，作为其成份，表示了从 Na_2O 、 Li_2O 、 Al_2O_3 、 CaO 、 Ga_2O_3 、 GeO_2 、 As_2O_3 、 SrO_2 、 Y_2O_3 、 Sb_2O_5 、 In_2O_3 、 ZnO 、 BaO 、 La_2O_3 、 TeO_2 、 TiO_2 中选出的组成。但是，专利文献 1 中，没有发现对于这些玻璃的热稳定性、非线性特性和碲化物光纤的分散有关的描述。

E.S.Hu 他们在非专利文献 8 中，公开了使用碲化物玻璃，设计 PCF 构造或 HF 构造，而使零分散波长移到 1.55 微米的光纤。根据该文献，表示了可以使用零材料分散波长为 1.7 微米的碲化物玻璃来形成三个不同的 PCF 构造或 HF 构造，在这些构造中可以将零分散波长移到 1.55 微米。但是，在非专利文献 8 中所公开的光纤中，由于所使用的碲化物玻璃的非线性灵敏度低、且零材料分散波长为 1.7 微米，所以向纤芯区域的光封入不充分，因此，不能得到充分大的非线性特性（所报道的非线性常数 γ 最大为 $260\text{W}^{-1}\text{km}^{-1}$ ）。

由于碲化物玻璃具有大的三次非线性特性，所以研究了利用由具有该高非线性特性的碲化物玻璃构成的光纤的系统。例如，提出了如图3所示，通过由碲化物玻璃构成的纤芯5和包层6构成光纤8，而用于拉曼放大器等的放大用（例如，参照非专利文献9）。

5 另外，碲化物EDFA的长波长侧的增益所得的界限与石英系EDFA和氟化物EDFA相比，宽7~9nm。因此，可以实现现有中不能使用的1.6微米波带的波长的放大器（例如，参照非专利文献4）。因此，碲化物EDFA作为将来的超大容量WDM传送系统的EDFA引人注目。

10 使用了碲化物玻璃的光纤迄今为止用于 Er^{3+} 添加光纤放大器和拉曼放大器，实现了宽带放大（参照非专利文献1、非专利文献8）。碲化物玻璃与石英玻璃相比，具有10倍以上的大非线性光学效应，同时，在向拉曼放大器应用时，实现了损耗为20dB/km的低损耗光纤。这样，碲化物玻璃具有宽带光放大特性和高透明性。除此之外，具有大的光非线性灵敏度 χ^3 （例如，参照非专利文献5）。因此，可以期待之前没有的小型高效的非线性设备。

15 但是，碲化物玻璃制的光纤由于材料分散为零的波长位于比2微米长的波段，所以满足作为通信波段的1.55微米频带信号光和泵光的相位匹配条件困难，更积极地利用非线性特性变得困难。例如，用于光放大器用的碲化物玻璃制的光纤在波长1.55微米中，波长分散值为-100ps/km/nm左右。

20 另外，如分散偏移光纤和分散补偿光纤那样，通过适用现有的光纤结构，即使提高纤芯和包层的相对折射率差来控制分散，在碲化物玻璃制的光纤中，零分散波长进一步向长波长侧偏移。因此，碲化物玻璃制的光纤中，实现作为通信波长带的1.55微米频带的零分散极其困难，不能实现利用了由具有高非线性特性的碲化物玻璃构成的光纤的通信系统。

25 对于制作方法，作为由石英系玻璃之外的氧化物玻璃构成的光子晶体光纤或中空光纤的制作方法，报道了挤出法（参照非专利文献10、非专利文献11）。在该挤出法中，将所制造的块玻璃（bulk glass）高温加热到可变形的粘度，通过塞到模具中而挤出，来制作具有气孔的母材。挤出法由于长时间高温保持玻璃，并进一步变形，所以玻璃中

很容易生长结晶核，但制作低损耗的光纤很难。因此，非专利文献 10、非专利文献 11 所记载的光纤的损耗值都超过了 1000dB/km，不能得到具有可作为实用设备使用的损耗的设备。

5 专利文献 1: EP1313676、US2003/0161599 “Holy optical fiber of non-silica based glass” Southampton University

专利文献 2: 特开 2003-149464 号公报

专利文献 3: 特开 2000-356719 号公报

10 非专利文献 1: A.Mori, Y.Ohishi, M.Yamada, H.Ono, Y.Nishida, K.Oikawa, and S.Sudo, “1.5 μ m broadband amplification by tellurite-based DFAs, ” in OFC’97, 1997, Paper PD1.

非专利文献 2: 川上彰二郎、白石和男、大桥正治著、“光纤和纤型设备”、培风馆、p97

非专利文献 3: A.Bjaklev, et al., “Photo Crystal Fibers The State of The Art” , Holy fibers Symposium vol.1.1, ECOC2002

15 非专利文献 4: A.Mori, Y.Ohishi, M.Yamada, H.Ono and S.Sudo, “Broadband amplification characteristics of tellurite-based EDFAs, ” in ECOC’97, vol.3, 1997, Paper We2C.4, pp.135-138

20 非专利文献 5: S.Kim T.Yoko and S Sakka, “Linear and Nonlinear Optical Properties of TeO₂Glass”, J.AM.Ceram.Soc., Vol.76, No.10, pp.2486-2490, 1993

非专利文献 6: M.J.Gander, R.McBride, J.D.C.Jones, D.Mogilevtsev, T.A.Birks, J.C.Knigh, and P.St.J.Russell, “Experimantal measurement of group velocity dispersion in photonic crystal fibre,” Electron.Lett., Jan.1999, vol.35, no.1, pp.63-64

25 非专利文献 7: T.A.Briks, D.Mogilevtsev, J.C.Knigh, P.St.J.Russell, “Dispersion compensation using single-material fibers” Opt.Lett.22, 1997, pp.961-963

30 非专利文献 8: ECOC2002 Nonlinerity-Parametric Amplifiers 3.2.3 Design of Highly-Nonlinear tellurite fibers with Zero Dispersion Near 1550 nm, Stanford University

非专利文献 9: “Journal of Lightwave Technology”, 2003, Vol.21, No.5, p.1300-1306

非专利文献 10: P.Petropoulos, et al., "Soliton-self-frequency-shift effects and pulse compression in an anomalously dispersive high nonlinearity lead silicate holy fiber", PD3-1, OFC2003

非专利文献 11: V.V.Ravi Kanth Kunth,et al., "Tellurite glass photonic crystal fiber" PD3, ECOC2003

非专利文献 12: Gorachand Ghosh, "Sellmeier Coefficients and Chromatic Dispersiond for Some Tellurite Glasses", J.Am.Soc., 78(10)2828-2830,1995

非专利文献 13: "Photonics Technology Letters", 1999, Vol.11, No.6,p.674-676

非专利文献 14: A.Mori,et al., "Ultra-wideband tellurite-Based Raman fibre amplifier", Electronics Letter vol.37, No.24, pp.1442-1443,2001

非专利文献 15: Govind P.Agrawal, "Nolinear Fiber Optics", 2nd edition, Academic Press, pp.42-43

发明内容

本发明鉴于现有技术的上述这种问题而作出, 其第一目的是提供一种可以避免材料分散的影响, 且对利用了非线性特性的光信号处理等带来大的效果, 可以实现通信波段上的宽带的零分散的具有高非线性的碲化物玻璃构成的光纤。

本发明的第二目的是提供一种在作为通信波段的 1.2~1.7 微米频带上控制零分散波长、使用了碲化物玻璃的低损耗且高效率的光纤的制造方法。

一般, 玻璃的非线性灵敏度其值越高, 零材料分散波长向长波长侧偏移。通过 PCF 构造或 HF 构造的强封入, 使其零分散波长向通信波段偏移的方法作为非线性光纤应用是有效的。

本发明人公开了在零材料分散波长为 2 微米以上、非线性灵敏度 χ^3 高到 1×10^{-12} esu 以上、在低损耗纤维中使用了加工时具有充分热稳定性的碲化物玻璃的光纤中, 通过采用向纤芯区域封入的强的 PCF 构造或 HF 构造, 可解决现有技术的上述问题。即, 发现要光以低损耗来导波, 通过气孔的大小和形状及相邻的气孔彼此的间隔向通信波段(1.2~1.7 微米)内控制零分散波长, 同时发现了具有非线性常数 γ 为

500W⁻¹km⁻¹ 以上的大的非线性特性。

为了达到上述第一目的，本发明的第一形态的光纤，传送在光纤通信或光设备中所用的光，光纤的至少纤芯区域由具有 2 微米以上的零材料分散波长的碲化物玻璃构成，通过在该光纤内配置气孔，使得将光封入该光纤的中心，从而将零分散波长控制为 1.2~1.7 微米频带。

这里，优选在光的波长为 λ 、圆周率为 π 时，在光纤的中心设置具有 $\pi \lambda^2$ 的 0.1 倍到 5 倍的面积的区域，通过在除去该区域的该光纤的截面的整个区域上或包围该区域的位置上配置气孔，该区域成为封入光的纤芯。

另外，优选是具有 2 微米以上的零材料分散波长的碲化物玻璃，具有由 $\text{TeO}_2\text{—Bi}_2\text{O}_3\text{—LO—M}_2\text{O—N}_2\text{O}_3\text{—Q}_2\text{O}_5$ 构成的组成（L 是 Zn、Ba、Mg 中的至少一种以上，M 是 Li、Na、K、Rb、Cs 中的至少一种以上的碱元素、N 是 B、La、Ga、Al、Y 中的至少一种以上，Q 是 P、Nb 中的至少一种以上），其成份为

50<TeO₂<90 （摩尔%）

1<Bi₂O₃<30 （摩尔%）

1<LO+M₂O+N₂O₃+Q₂O₅<50 （摩尔%）。

另外，优选向碲化物材料玻璃添加 Ce³⁺、Pr³⁺、Nd³⁺、Pm³⁺、Sm³⁺、Eu³⁺、Tb³⁺、Dy³⁺、Ho³⁺、Er³⁺、Tm³⁺、Yb³⁺ 内选择的至少一种作为稀土类离子。

为了实现上述第一目的，本发明的第二形态的光纤是由碲化物玻璃构成的光纤，包括：纤芯区域；第一包层部，配置为包围纤芯区域，在该纤芯区域的周围方向具有多个沿该纤芯区域的轴方向的气孔；第二包层部，配置为包围第一包层部，具有与该第一包层部的等效折射率大致相等的折射率。

优选第一包层部的气孔沿纤芯区域的周围方向以一定间隔形成多个。另外，优选第一包层部的气孔在该第一包层部的半径方向上形成多个。另外，优选第一包层部的气孔内部由具有比第二包层部的折射率低的折射率的材料来填充。另外，优选纤芯区域的折射率比第一包层部的材料的折射率高。另外，优选，将具有与碲化物玻璃的折射率不同折射率的碲化物玻璃嵌入到作为纤芯的中心部中。

优选，纤芯区域和第一包层部的相对折射率差为 2%以上。

优选，在为纤芯区域的中心部设置气孔。

5 优选，将在纤芯区域之外形成的气孔配置为三角晶格状、四边晶格状或蜂窝形状的任一个形状。优选，该气孔由圆柱、椭圆柱或多角柱的其中一个形状构成。

优选，在纤芯区域之外形成的气孔数是 3 个，作为纤芯区域的直径为 0.6~6.5 微米。优选，气孔数是 4 个，作为纤芯的区域的直径是 0.6~5 微米。

10 为了实现上述第二目的，本发明的第三形态的光纤的制造方法，包括：第一工序，光纤为具有 2 微米以上的零材料分散波长的碲化物玻璃、至少将具有由 $\text{TeO}_2\text{—Bi}_2\text{O}_3\text{—LO—M}_2\text{O—N}_2\text{O}_3\text{—Q}_2\text{O}_5$ 构成的组成（L 是 Zn、Ba、Mg 中的至少一种以上，M 是 Li、Na、K、Rb、Cs 中的至少一种以上的碱元素、N 是 B、La、Ga、Al、Y 中的至少一种以上，Q 是 P、Nb 中的至少一种以上），其成份为

15 $50 < \text{TeO}_2 < 90$ （摩尔%）

$1 < \text{Bi}_2\text{O}_3 < 30$ （摩尔%）

$1 < \text{LO} + \text{M}_2\text{O} + \text{N}_2\text{O}_3 + \text{Q}_2\text{O}_5 < 50$ （摩尔%）

20 的碲化物玻璃（下面，称作本发明中特定的碲化物玻璃）作为纤芯材料，向内壁的内侧形成了多个凸部分的模具注入成型碲化物玻璃熔液来制作母材；第二工序，将由第一工序制作的玻璃母材插入由碲化物玻璃构成的圆筒状的套管中，进行加压拔丝，使得维持或放大玻璃母材和套管的间隙的气孔。

25 为了实现上述第二目的，本发明的第四形态的光纤的制造方法，包括：第一工序，光纤至少将本发明中特定的上述碲化物玻璃作为纤芯材料，向内壁的内侧形成了多个凸部分、内壁向底部放大加工为圆锥状的模具注入成型碲化物玻璃熔液来制作母材；第二工序，进一步注入由碲化物玻璃构成的纤芯玻璃的玻璃熔液，通过包层玻璃的体积收缩来制作将芯部玻璃吸入成型为圆锥状的玻璃母材；第三工序，将由第二工序制作的玻璃母材插入由碲化物玻璃构成的圆筒状的套管，30 进行加压拔丝，使得维持或放大玻璃母材和套管的间隙的气孔。

为了实现上述第二目的，本发明的第五形态的光纤的制造方法，

包括：第一工序，光纤至少将本发明中特定的上述碲化物玻璃作为纤芯材料，向内壁的内侧形成了多个凸部分、内壁向底部放大加工为圆锥状、底部具有孔的模具注入成型碲化物玻璃熔液来制作母材；第二工序，进一步注入由碲化物玻璃构成的纤芯玻璃的玻璃熔液，通过包层玻璃的体积收缩和从孔流出包层玻璃来制作纤芯玻璃吸入成型为圆锥状的玻璃母材；第三工序，将由第二工序制作的玻璃母材插入由碲化物玻璃构成的圆筒状的套管，进行加压拔丝，使得维持或放大玻璃母材和套管的间隙的气孔。这里，优选该第二工序从孔进行真空抽气，而流出包层玻璃。

10 为了实现上述第二目的，本发明的第六形态的光纤的制造方法，包括：第一工序，光纤至少将本发明中特定的上述碲化物玻璃作为纤芯材料，向模具注入成型由碲化物玻璃构成的玻璃熔液来制作圆柱状的玻璃块体；第二工序，在由该第一工序制作的玻璃块体的长边方向加工开孔，来制作形成了气孔的玻璃母材；第三工序，将由第二工序制作的玻璃母材插入由碲化物玻璃构成的圆筒状的套管，进行加压拔丝，使得维持或放大气孔。

20 为了实现上述第二目的，本发明的第七形态的光纤的制造方法，包括：第一工序，光纤至少将本发明中特定的上述碲化物玻璃作为纤芯材料，将由碲化物玻璃构成的玻璃熔液注入到底面具有从基台在内侧排列了多个圆柱棒状的销体的钻模（jig）的模具中，通过拔出钻模来制作形成了气孔的母材；第二工序，将由第一工序制作的玻璃母材插入由碲化物玻璃构成的圆筒状的套管，进行加压拔丝，使得维持或放大所述气孔。

发明的效果

25 根据本发明的第一形态的光纤，传送在光纤通信或光设备中所用的光，光纤的至少纤芯区域由具有 2 微米以上的零材料分散波长的高非线性碲化物玻璃构成，通过在该光纤内配置气孔，使得将光封入该光纤的中心，而可以在纤芯区域上传送光，通过构造分散可以将零分散波长控制为 1.2~1.7 微米频带，同时，可以得到高的非线性常数。

30 因此，可以提供小型且高效的作为非线性设备的光纤。

这里，在光的波长为 λ 、圆周率为 π 时，在上述光纤的中心设置

具有 $\pi \lambda^2$ 的 0.1 倍到 5 倍的面积的区域，通过在除去区域的光纤的截面的整个区域上或包围区域的位置上配置上述气孔，光封入到由该区域构成的纤芯中，在光纤的纤芯内传送光。因此，可以高效抑制高次模式。

5 另外，通过适当选择碲化物玻璃的组成，可以制作对纤化加工有充分的热稳定，非线性常数高、低损耗的光纤。其中虽然 TeO_2 和 Bi_2O_3 是提供高非线性特性用的必须成份，但是若脱离

$50 < \text{TeO}_2 < 90$ （摩尔％）

$1 < \text{Bi}_2\text{O}_3 < 30$ （摩尔％）

10 的范围则不能得到热稳定且透过特性好的玻璃。其他成份是为了使玻璃热稳定，降低粘度而容易加工来进行添加。

另外，通过向碲化物玻璃材料添加 Ce^{3+} 、 Pr^{3+} 、 Nd^{3+} 、 Pm^{3+} 、 Sm^{3+} 、 Eu^{3+} 、 Tb^{3+} 、 Dy^{3+} 、 Ho^{3+} 、 Er^{3+} 、 Tm^{3+} 、 Yb^{3+} 内的至少一种作为稀土类离子，可以在提供非线性的同时，提供由光放大、吸收形成的滤波效果等的特性。

15

上述光纤是由碲化物玻璃构成的光纤，包括：纤芯区域；第一包层部，配置为包围纤芯区域，在该纤芯区域的周围方向具有多个沿该纤芯区域的轴方向的气孔；第二包层部，配置为包围第一包层部，具有与该第一包层部的等效折射率大致相等的折射率，所以为可实现通信波段中的宽频带零分散的高非线性碲化物光纤。另外，由于可减小气孔的数目，所以可以容易地制造低成本、高精度的光纤。

20

另外，通过向上述纤芯区域嵌入折射率比碲化物玻璃高的组成的碲化物玻璃，在由嵌入的折射率高的碲化物玻璃和其周围的碲化物玻璃形成的界面上在纤芯区域传送的光全反射，在光纤的纤芯内传送光，所以减小了光的传送损耗。

25

另外，通过向上述气孔嵌入折射率比碲化物玻璃具有的折射率低的材料，光纤整体的机械强度提高。进一步，在从作为光纤的母材的预制坯来拔丝光纤的工序中，比向气孔中填充空气，气孔的形状容易保持一定，制造品质提高了。另外，与向气孔中填充空气时相比，可以减少光的散射损耗。

30

通过将上述气孔配置为三角晶格状、四边晶格状或蜂窝形状的其

中一个形状，在由气孔包围的纤芯中集中光，在纤芯内传送光。因此，没有必要高精度制造光纤，所以可以抑制制造成本。

通过上述气孔由圆柱、椭圆柱或多角柱的其中一个形状构成，在纤芯中集中光，在纤芯内传送光。因此，没有必要高精度制造光纤，
5 所以可以抑制制造成本。

根据本发明的第三～第七形态的光纤的制造方法，与石英玻璃相比，使用具有 30 倍以上的非线性灵敏度 (χ^3) 的热稳定性好的碲化物玻璃组成，通过注入成型来制作玻璃母材，从而与现有的挤出法相比，由于对玻璃母材的加热工序的时间短，所以可大量制作低损耗的碲化物光纤，同时，可以将零分散偏移到作为光通信波段的 1.2~1.7 微米
10 频带，所以可以提供小型的作为高效的非线性设备的光纤。

附图说明

图 1 是表示现有的碲化物玻璃光纤的截面图；
15 图 2 是图 1 所示的光纤的折射分布图；
图 3 是表示现有的光纤的一例的示意构造的直径方向的截面图；
图 4 是本发明的实施例 1 的光纤的截面图；
图 5 是在本发明的实施例 1 的光纤中，表示零分散区域的曲线；
图 6 是表示由本发明的实施例 1 的光纤形成的波长分散特性的曲
20 线；
图 7 是表示本发明的实施例 1 的光纤的纤芯周围的电场状态的电
解分布图；
图 8A 是本发明的实施例 2 的光纤的截面图；
图 8B 是图 8A 的主要部分的放大图；
25 图 9 是表示由本发明的实施例 2 的光纤形成的波长分散特性的曲
线；
图 10A 是本发明的实施例 3 的光纤的截面图；
图 10B 是图 10A 的主要部分的放大图；
图 11A 是本发明的实施例 4 的光纤截面图；
30 图 11B 是图 11A 的主要部分的放大图；
图 12 是本发明的实施例 5 的光纤的截面图；

图 13 是本发明的实施例 6 的光纤的纤芯周围的截面图；

图 14 是本发明的实施例 7 的光纤的纤芯周围的截面图；

图 15 是本发明的实施例 8 的光纤的纤芯周围的截面图；

5 图 16 是表示本发明的实施例 9 的光纤的示意构造的直径方向的截面图；

图 17 是表示图 16 的光纤的等效折射率分布的曲线；

图 18 是表示图 16 的光纤的分散特性的曲线；

图 19 是表示图 16 的光纤的折射率分布的曲线；

图 20 是表示现有的光纤的另一例的折射率分布的曲线；

10 图 21 是表示现有的光纤的另一例的折射率分布的曲线；

图 22 是表示本发明的实施例 10 的光纤的示意构造的直径方向的截面图；

图 23 是表示本发明的实施例 10 的光纤的另一示意构造的直径方向的截面图；

15 图 24 是表示本发明的实施例 11 的光纤的等效折射率分布和折射率分布的曲线；

图 25 是表示本发明的实施例 12 的光纤的示意构造的直径方向的截面图；

20 图 26A 是表示本发明的实施例 13 和实施例 20 的光子晶体光纤的制作方法的第一工序的工序图；

图 26B 是表示本发明的实施例 13 和实施例 20 的光子晶体光纤的制作方法的第二工序的工序图；

图 26C 是表示本发明的实施例 13 和实施例 20 的光子晶体光纤的制作方法的第三工序的工序图；

25 图 26D 是表示本发明的实施例 13 和实施例 20 的光子晶体光纤的制作方法的第四工序的工序图；

图 26E 是表示本发明的实施例 13 和实施例 20 的光子晶体光纤的制作方法的第五工序的工序图；

图 27A 是表示本发明的实施例 13 的光子晶体光纤的截面图；

30 图 27B 是表示图 27A 的主要部分的放大图；

图 28 是表示本发明的实施例 13 的光子晶体光纤的分散的曲线；

图 29 是表示本发明的实施例 13 的光子晶体光纤的纤芯直径和零分散波长的关系的曲线;

图 30 是表示本发明的实施例 13 的波长转换装置的结构图;

图 31 是表示图 30 的波长转换装置的输出光谱的特性图;

5 图 32A 是本发明的实施例 15 的光子晶体光纤的制作方法的第一工序的工序图;

图 32B 是本发明的实施例 15 的光子晶体光纤的制作方法的第二工序的工序图;

10 图 32C 是本发明的实施例 15 的光子晶体光纤的制作方法的第三工序的工序图;

图 33 是表示本发明的实施例 15 的光子晶体光纤的截面图;

图 34 是表示由本发明的实施例 15 的光子晶体光纤产生的超连续光的光谱的图;

15 图 35A 是表示本发明的实施例 16 的光子晶体光纤的制造方法的工序图;

图 35B 是表示由图 35A 的工序得到的光子晶体光纤的图;

图 36 是表示本发明的实施例 16 的波长可变脉冲光源的结构图;

图 37 是表示本发明的实施例 16 的参数光放大器的结构图;

图 38 是表示图 37 的参数光放大器的输出光谱的曲线;

20 图 39A 是表示本发明的实施例 17 的光子晶体光纤的制作方法的第一工序的工序图;

图 39B 是表示本发明的实施例 17 的光子晶体光纤的制作方法的第二工序的工序图;

图 40A 是本发明的实施例 17 的光子晶体光纤的截面的截面图;

25 图 40B 是图 40A 的主要部分的放大图;

图 41A 是表示本发明的实施例 18 的光子晶体光纤的制作方法的工序图;

图 41B 是表示图 41A 的制作装置的主要部分的构造的图;

图 41C 是表示由图 41A 的工序得到的光子晶体光纤的图;

30 图 42 是表示本发明的实施例 18 的光克尔快门(kerr shutter)实验系统的构造图;

图 43A 是本发明的实施例 19 的光子晶体光纤的制作方法的工序图；

图 43B 是图 43A 的制作装置的主要部分的结构的图；

图 43C 是表示由图 43A 的工序得到的光子晶体光纤的图；

5 图 44 是表示本发明的实施例 19 的非线性光纤环型反射镜的构造图；

图 45 是表示本发明的实施例 19 的时钟再现装置的构造图；

图 46 是表示本发明的实施例 20 的光纤的截面图；

图 47 是表示本发明的实施例 20 的光纤的光电场分布的图；

10 图 48 是表示本发明的实施例 20 的光纤的波长分散的曲线；

图 49 是表示本发明的实施例 21 的光纤的截面图；

图 50 是表示本发明的实施例 21 的光纤的光电场分布的图；

图 51 是表示本发明的实施例 21 的光纤的波长分散的曲线；

图 52 是表示本发明的实施例 22 的光纤的截面图；

15 图 53 是表示本发明的实施例 22 的光纤的光电场分布的图；

图 54 是表示本发明的实施例 22 的光纤的波长分散的曲线；

图 55 是表示本发明的实施例 23 的光纤的截面图；

图 56 是表示本发明的实施例 23 的光纤的光电场分布的图；

图 57 是表示本发明的实施例 23 的光纤的波长分散的曲线；

20 图 58 是表示本发明的实施例 24 的光纤的截面图；

图 59 是表示本发明的实施例 24 的光纤的波长分散的曲线；

图 60 是表示本发明的实施例 25 的光纤的截面图；

图 61 是表示本发明的实施例 25 的光纤的波长分散的曲线；

图 62 是表示本发明的实施例 26 的光纤的截面图；

25 图 63 是表示本发明的实施例 26 的光纤的波长分散的曲线；

图 64 是表示本发明的实施例 27 的光纤的截面图；

图 65 是表示本发明的实施例 27 的光纤的波长分散的曲线；

图 66 是表示本发明的实施例 28 的光纤的截面图；

图 67 是表示为图 66 的光纤的纤芯的区域的放大图；

30 图 68 是表示本发明的实施例 28 的光纤的零分散波长和纤芯大小的关系曲线；

图 69 是表示本发明的实施例 29 的光纤的截面图；

图 70 是表示为图 69 的光纤的纤芯的区域的放大图；

图 71 是表示本发明的实施例 29 的光纤的零分散波长和纤芯大小的关系的曲线；

5 图 72 是表示本发明的实施例 30 的光纤的截面图；

图 73 是表示为图 72 的光纤的纤芯的区域的放大图；

图 74 是表示本发明的实施例 30 的光纤的零分散波长和纤芯大小的关系的曲线；

图 75 是表示本发明的实施例 31 的光纤的截面图；

10 图 76 是表示为图 75 的光纤的纤芯的区域的放大图；

图 77 是表示本发明的实施例 31 的光纤的零分散波长和纤芯大小的关系曲线。

符号说明：10 光纤；11 气孔；12 纤芯；13 包层；100、120、130、140、150、160、170 光纤；101、111 纤芯部；102 第一包层部；102a
15 气孔；103 第二包层部；201 金属模具；202 玻璃熔液；203 玻璃母材；204 套管；205 延伸后的母材；206 线材直径的固定部分；207 光子晶体光纤；208 孔的形成部分；2101、2301、2305、2401、2405、2501、2601、2701、2801、2805、2901、2905、3001、3101、3201、3205、3301、3305 碲化物玻璃；2102、2302、2402、2502、2602、2702、2802、
20 2902、3002、3102、3202、3302 成为纤芯的区域；2103、2303、2403、2503、2505、2603、2703、2803、2903、3003、3005、3103、3203、3303 气孔；2104、2304、2404、2504、2604、2704、2804、2904、3004、3104、3204、3304 套管。

25 具体实施方式

本发明的一实施方式中，在使用了碲化物玻璃的光子晶体光纤中，在相当于纤芯部分的周围为设置了多个折射率为 1 的气孔的构造，而将零分散波长控制为作为光通信频带的 1.2~1.7 微米频带。尤其，优选气孔为 4 个，由十字型的包层玻璃支撑相当于纤芯的部分的构造。
30 通过使气孔为偶数来保持结构的对称性，可以减轻偏波依赖性。另外，作为 4 个的简单结构，可以使延伸工序的控制变得容易，同时，通过 4

分割制作母材的模具，可以容易取出玻璃母材。

本发明的一实施方式中，通过适当选择碲化物玻璃的组成，可以制作对纤化加工充分热稳定、非线性常数高、且低损耗的光纤。其中，虽然 TeO_2 和 Bi_2O_3 是提供高非线性特性用的必须成份，但是若脱离了

5 $50 < \text{TeO}_2 < 90$ (摩尔%)

$1 < \text{Bi}_2\text{O}_3 < 30$ (摩尔%)

的范围，则不能得到热稳定且透过特性好的玻璃。除此之外的成份是为了使玻璃热稳定，降低粘度而容易加工，来进行添加的。

本发明的一实施方式中，通过在碲化物玻璃材料中添加 Ce^{3+} 、 Pr^{3+} 、
10 Nd^{3+} 、 Pm^{3+} 、 Sm^{3+} 、 Eu^{3+} 、 Tb^{3+} 、 Dy^{3+} 、 Ho^{3+} 、 Er^{3+} 、 Tm^{3+} 、 Yb^{3+} 中的至少一个作为稀土类离子，而可以与提供非线性特性的同时，提供由光放大、吸收进行的滤光效果等的特性。

说明本发明的一实施方式的碲化物光纤。以 TeO_2 为主要成份的玻璃折射率 n_D 为 2 左右，同时，材料波长分散在 1.2~1.7 微米频带中具有大的负分散，零分散波长位于超过了 2 微米的长波长侧（例如，参
15 照非专利文献 12）。因此，即使使用碲化物玻璃来制作具有步长指数（step index）型的纤芯/包层折射率分布（profile）的光纤，其光纤的波长分散特性不会从材料波长分散的特性大大变化。

表 1 表示了对本发明的一实施方式的用于碲化物光子晶体光纤的玻璃组成（mol%表示）的一例、各个玻璃组成的热稳定性（ $T_x - T_g$ ：
20 $^{\circ}\text{C}$ ）、折射率 n_D 、非线性灵敏度 χ^3 （esu）、紫外吸收端 UV（nm）、零材料分散波长（微米）所测量的实验结果。

[表 1]

No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
TeO ₂	75	80	70	65	55	40	60	65	65	70	70	70	70	75	75	75	75	80	80	80	80	85	85	90
Bi ₂ O ₃	0	2	10	20	30	10	8	15	12	12	7	8	10	15	10	10	7	7	8	7	7	5	5	5
ZnO	5		5					7	5		8				5	5	5					3		
BaO		5			5	20	7			5						5			5		5			
MgO				5								5								5				
Li ₂ O	10					10			13			10					12	8						
Na ₂ O		7			5	6					5			5							5			
K ₂ O			8				5						7						7			7		
Rb ₂ O				5			10			10						10								5
Cs ₂ O					5			8							5					5				
B ₂ O ₃	5					4							5											
La ₂ O ₃							5				5												5	
Ga ₂ O ₃		6							5			2		5										
Al ₂ O ₃			7							3														
Y ₂ O ₃				5			5				5				5								5	
P ₂ O ₅	5											5									3			
Nb ₂ O ₃						10		5					8							3				
T _x -T _g	90	150	120	140	70	80	150	140	180	160	150	160	170	150	300<	140	300<	300<	300<	160	180	140	130	50
nD	1.98	2.07	2.18	2.21	2.23	1.85	2.15	2.2	2.18	2.13	2.1	2.05	2.09	2.2	2.09	2.03	2.07	2.12	2.11	2.13	2.08	2.12	2.13	2.16
$\chi^3(\times 10^{-12})$	0.5	1	1.2	2	2.6	0.6	1.2	2	1.8	1.3	1.2	1.1	1.5	2	1.6	1.4	1.3	1.7	1.5	1.8	1.5	1.6	1.5	2
UV (nm)	360	365	370	378	410	390	380	390	385	375	370	380	375	380	375	380	370	375	370	380	370	365	380	390
Zero (μm)	1.8	2.1	2.4	2.7	3	1.9	2.2	2.6	2.4	2.3	2.2	2.15	2.3	2.5	2.3	2.2	2.3	2.5	2.4	2.6	2.2	2.5	2.6	2.8

玻璃试样以下面的顺序来制作。在填充有氮气的球体盒（globe box）内混合原料后，使用金或白金坩锅，在氧气环境气下，在 800～1100℃下熔融，之后，向预加热到 300～400℃的模型中流入熔液。由于加工为光纤，需要玻璃母材的延伸・拔丝等的重新加热，所以为了实现损耗低、强度强的光纤，热稳定性是重要的因素。由于碲化物玻璃一般在比玻璃转变温度（glass transition temperature）T_g 高 30～80℃的温度下进行延伸・拔丝加工，所以优选作为热稳定性指标的 T_x（结晶化温度）－T_g（玻璃转变温度）在 100℃以上。

表 1 的玻璃组成中，虽然 No.1～5 是 Bi₂O₃ 的添加量变化为 0～30mol%，但是可以看出 No.1 的 0mol%和 No.5 的 30mol%中，作为热稳定性指标的 T_x-T_g 为 100℃以下，热稳定性不充分。另外，No.6 TeO₂ 为 50mol%以下，No.24 TeO₂ 为 90mol%以上，该情况下 T_x-T_g 也分别在 100℃以下，可以看出热稳定性不充分。TeO₂ 和 Bi₂O₃ 在本实施方式中是带来高非线性特性的必要成份，从以上方面来看，为

$$50 < \text{TeO}_2 < 90 (\text{摩尔}\%)$$

$$1 < \text{Bi}_2\text{O}_3 < 30 (\text{摩尔}\%)$$

$$1 < \text{LO} + \text{M}_2\text{O} + \text{Q}_2\text{O}_3 + \text{R}_2\text{O}_5 < 50 (\text{摩尔}\%)$$

的范围是必要的。可以看出在表现为上述之外的组成例中，加工为光纤不具有充分的热稳定性。

若整理表 1 的组成，则碲化物玻璃具有由 TeO₂-Bi₂O₃-LO-M₂O-Q₂O₃-R₂O₅ 构成的组成，这里，L 是 Zn、Ba、Mg 中的至少一种以上，M 是 Li、Na、K、Rb、Cs 中的至少一种以上，Q 是 B、La、Ga、Al、Y 中的至少一种以上，R 是 P、Nb 中的至少一种以上。同时具有这种高非线性特性和热稳定性的碲化物玻璃是，材料分散为零的波长为 2 微米以上，按照控制光纤的零分散波长进行构造设计时，为重要的物理参数。

下面，参照附图，详细描述本发明的实施例。作为本发明的光纤的实施方式，虽然使用实施例进行了说明，但是本发明并不限于下述实施例。进一步，下述实施例虽然是以光子带隙构造为导波原理的基础的光纤，但是还同时具备由纤芯・包层的实际折射率差而引起的全

反射构造。因此，光纤中，光子带隙条件和周期性·均匀性并不必然严格需要。

实施例 1

图 4 表示本发明的实施例 1 的光纤的截面。如图 4 所示，由零材料分散波长为 2.08 微米的碲化物玻璃构成的光纤 10 具有多个圆形的气孔 11。在这些气孔 11 中充满了空气。这些气孔 11 的光折射率大致等于真空中的光的折射率 1。

气孔 11 的排列是在该光纤 10 的直径方向的截面中，由配置为有规则地（周期性）相邻的多个三角形的各顶点构成的三角晶格状的排列。这些气孔 11 在光纤 10 的长边方向上具有相同结构。即，气孔 11 不是三维排列的光子带隙，而是在长边方向上均匀排列。因此，若忽略光纤 10 的生成工序带来的形状摆动（失真），该光纤的截面在光纤 10 的长边方向上为同一构造，不存按照与光纤 10 的长边方向垂直或斜交而配置气孔的构造。即，在光纤 10 上配置的气孔 11 在该光纤 10 的长边方向上连续延伸，即使在长边方向的任何位置上截断，也为同一截断面。

但是，光纤 10 的中心中，气孔 11 的排列缺少周期性。由缺少周期性排列的气孔 11 所包围的区域在光的波长为 λ 、圆周率为 π 时，纤芯区域为 $\pi \lambda^2$ 的 0.1 到 5 倍的大小。该区域为光集中的纤芯 12，从该区域开始在该光纤 10 的半径方向上不传送光。即，光纤 10 是周期性配置气孔 11 的具有衍射光栅的光子带隙构造。即，光纤 10 在光纤 10 的中心具有纤芯 12 和由在纤芯 12 的周围周期性配置的气孔 11 构成的包层 13。另外，通过改变相邻气孔彼此的间隔，可以改变由缺少周期性配置的气孔 11 包围的区域、即纤芯 12 的直径。

设相邻气孔彼此的间隔为 Δ 、气孔的直径为 d 。光纤 10 中，为零分散的区域，如图 5 所示，为由连接 (Δ, d) 为 $(0, 0)$ 与 $(5, 5)$ 的直线和连接 (Δ, d) 为 $(2, 0)$ 与 $(5, 4)$ 的直线所包围的区域 B。点 A 是 (Δ, d) 为 $(2.3, 2.0)$ ，位于为零分散区域的区域 B 内。

另外，若改变碲化物玻璃的材料组成，则分散为零的波长在 1.3 微米到 1.6 微米的范围内变化。这时，虽然相邻的气孔彼此的间隔 Δ 和气孔的直径 d 的范围也变化，但是大致位于图 5 所示的区域 B 内。

图6表示图5的点A,即相邻气孔的间隔 Δ 为2.3微米,气孔的直径 d 为2.0微米的光纤10产生的波长分散特性。如图6所示,在这种光纤10中,波长1.56微米为零分散。另外,图7表示该光纤10中,使用作为数值算法之一的差分法求出的光纤10的纤芯周围的光电场分布。另外,图7中的实线是电场变化为每10%的等高线。如图7所示,与通常的光纤相同,该光纤10的纤芯12为封入光的构造。

因此,根据这种光纤10,光通过光子带隙或全反射作用封入到纤芯12中,可以高效地抑制高次模式,即使放大纤芯12的直径也可以维持单模条件。

10 实施例2

图8A-图8B表示本发明的实施例2的光纤截面。图8A-图8B中,21是气孔,其中充满了空气,折射率大致等于1。22是表1的No.18的组成的碲化物玻璃。本实施例的光纤20中,在除去中心的截面整体上按三角晶格状配置了多个气孔21。进一步,通过将零材料分散波长为2.1微米,具有相对碲化物玻璃22作为相对折射率差高1.1%的折射率的碲化物玻璃嵌入到光纤中心部23的位置的光纤和具有相对碲化物玻璃22作为相对折射率差低0.5%的折射率的碲化物玻璃嵌入到光纤中心部23的位置上,来制作设置了作为传送光的纤芯区域的两种光纤。各个光纤外径为105微米,气孔直径 d 为1.6微米,气孔间隔 Δ 为2.2微米,嵌入的中心部23的碲化物玻璃直径 b 为1.5微米,传送光的纤芯直径 a 为2.8微米。

在截断、研磨由挤出法制作的上述两种光纤后,观察近视野像(NFP)、远视野像(FFP),可以确认在光纤中心部23中封入了光,分别达到了单模化。图9表示本光纤的波长分散的两次结果。如图9所示,本实施例的零分散波长 λ_0 在嵌入了高1.1%的折射率的碲化物的光纤和嵌入了低0.5%的折射率的碲化物的光纤中,波长分别为1.63微米和1.58微米。另外,有效纤芯截面积 A_{eff} 分别为 $3.7\mu\text{m}^2$ 、 $3.9\mu\text{m}^2$,非线性系数 γ 分别为 $650\text{W}^{-1}\text{km}^{-1}$ 、 $610\text{W}^{-1}\text{km}^{-1}$ 。

实施例3

图10A表示本发明的实施例3的光纤截面。图10A中,21是气孔,其中充满了空气,折射率大致等于1。22是表1的No.15的组成的碲

化物玻璃。本实施例的光纤中，在除去中心的截面整体上按三角晶格状配置了多个气孔 21，设置作为传送光的纤芯区域 24。光纤外径 D 为 105 微米。另外，如图 10B 所示，气孔直径 d 为 1.2 微米，气孔间隔 Δ 为 1.5 微米，传送光的纤芯直径 a 为 1.8 微米。

5 在截断、研磨所制作的光纤后，观察近视野像（NFP）、远视野像（FFP），可确认在光纤中心部中封入了光，达到了单模化。本实施例的零分散波长 λ_0 为波长 1.3 微米。若设纤芯直径为 a、圆周率为 π ，则纤芯区域 24 大致由 $\pi (a/2)^2$ 表示，若波长为 λ ，则该区域需要是 $\pi \lambda^2$ 的 0.1~5 倍。在 0.1 倍以下时，在模式不成立的同时，与石英光纤的连接变得困难，在 5 倍以上时，在零分散为 1.7 微米以上的同时，
10 变成多模传送。

实施例 4

图 11A 表示本发明的实施例 4 的光纤截面。图 11A 中，44 是包壳（套管）。41 是气孔，中间充满了空气，折射率大致等于 1。45 是零材料分散波长为 2.18 微米的碲化物玻璃。本实施例的光纤中，内部配置了 4 个孔 41，设置了作为传送光的纤芯区域 46。光纤外径 D 为 120 微米，气孔的内径为 40 微米。另外，作为纤芯区域的大小，内接于图 11B 所示的纤芯区域的正四边形的一边 a 为 2.0 微米。

在截断、研磨所制作的光纤后，观察近视野像（NFP）、远视野像
20 （FFP），可确认在光纤中心部中封入了光，达到了单模化。本实施例的零分散波长 λ_0 为波长 1.46 微米。若设纤芯直径为 a、圆周率为 π ，则纤芯区域 24 大致由 $\pi (a/2)^2$ 表示，若波长为 λ ，该区域需要是 $\pi \lambda^2$ 的 0.1~5 倍。在 0.1 倍以下时，在模式不成立的同时，与石英光纤的连接变得困难，在 5 倍以上时，在零分散为 1.7 微米以上的同时，
25 变成多模传送。

实施例 5

图 12 表示本发明的实施例 5 的光纤截面。如图 12 所示，由零材料分散波长为 2.1 微米的碲化物玻璃构成的光纤 30 与上述实施例 1 相同，具有三角晶格状配置，即周期性配置的多个圆状气孔 31。但是，
30 光纤 30 的中心部中，气孔 31 的排列缺少周期性。另外，在气孔 31 中嵌入了折射率比碲化物玻璃 33 低 Δn 的玻璃材料。由于与光纤 30 的中心

部分离的气孔 31 按周期状排列，所以为全反射光的包层 33，在光纤 30 的中心部中由缺少周期性排列的气孔 31 包围的区域为导波光的纤芯 32。该区域在光的波长为 λ 、圆周率为 π 时，纤芯区域为 $\pi \lambda^2$ 的 0.1 到 5 倍的大小。

5 因此，根据该光纤 30，由于在构成光子隙的气孔 31 中填充了折射率比碲化物玻璃 33 低的材料，所以光纤整体的机械强度变大。进一步，该材料填充的结果使得在从作为光纤 30 的母材的预制坯拉拔光纤 30 的工序中，与在气孔 31 中填充了空气相比还容易将气孔 31 的形状保持为一定，提高了制造质量。另外，与在气孔 31 中填充了空气的光纤
10 相比，可以减少光的散射损耗。

实施例 6

图 13 表示本发明的实施例 6 的光纤。如图 13 所示，由碲化物玻璃构成的光纤 40 改变了上述实施例 5 说明的光纤 30 具有的气孔 31 的排列状态。光纤 40 的气孔 41 的排列是在光纤 40 的直径方向的截面中，
15 由有规则地（周期性地）相邻配置的多个四边形的顶点构成的四角晶格状的排列。但是，光纤 40 的中心部中，气孔 41 的排列缺少周期性。由于周期性排列离开光纤 40 的中心部 40 的气孔 41，所以为全反射光的包层 43，在光纤 40 的中心部中由缺少周期性配置的气孔 41 所包围的区域为导波光的纤芯 42。该区域在光的波长为 λ 、圆周率为 π 时，
20 纤芯区域为 $\pi \lambda^2$ 的 0.1 到 5 倍的大小。另外，在气孔 41 中填充了比碲化物玻璃折射率低的材料。

因此，根据该光纤 40，实现了与上述实施例 5 所说明的光纤 30 相同的作用效果。

另外，可以是在气孔 41 中填充了空气的所有气孔，即使包含该情况，也可以在纤芯 42 中封入光，高效抑制高次模式，即使扩大纤芯 42
25 的直径也可以维持单模条件。

实施例 7

图 14 表示本发明的实施例 7 的光纤。如图 14 所示，由碲化物玻璃构成的光纤 50 改变了上述实施例 6 所说明的光纤 40 具有的气孔 41 的排列状态。光纤 50 的气孔 51 在光纤 50 的直径方向的截面中，排列
30 在有规则地（周期性地）相邻配置的六边形（蜂窝式）的各个顶点。

但是，光纤 50 的中心的，气孔 51 的排列缺少周期性。由于周期性排列离开光纤 50 的中心的的气孔 51，所以为全反射光的包层 53，在光纤 50 的中心的由缺少周期性配置的气孔 51 所包围的区域为导波光的纤芯 52。该区域在光的波长为 λ 、圆周率为 π 时，纤芯区域为 $\pi \lambda^2$ 的 0.1 到 5 倍的大小。另外，在气孔 51 中填充了比碲化物玻璃折射率低的材料。

因此，根据该光纤 50，实现了与上述实施例 6 所说明的光纤 40 相同的作用效果。

另外，可以是在气孔 51 中填充了空气的所有气孔，即使包括该情况，也可以在纤芯 52 中封入光，高效抑制高次模式，即使扩大纤芯 52 的直径也可以维持单模条件。

实施例 8

图 15 表示本发明的实施例 8 的光纤。如图 15 所示，由碲化物玻璃构成的光纤 60 改变了在上述实施例 5 中所说明的光纤 30 中排列的气孔 31 的形状。光纤 60 中，在与该光纤 60 的长边方向垂直的截面中，气孔 61 的形状为六边形。光纤 60 中，按三角晶格状排列、即周期性排列多个气孔 61。但是，光纤 60 的中心的，气孔 71 的排列缺少周期性。由于周期性排列离开光纤 60 的中心的的气孔 61，所以为全反射光的包层 63，在光纤 60 的中心的由缺少周期性配置的气孔 61 所包围的区域为导波光的纤芯 62。该区域在光的波长为 λ 、圆周率为 π 时，纤芯区域为 $\pi \lambda^2$ 的 0.1 到 5 倍的大小。另外，在气孔 61 中填充了比碲化物玻璃折射率低的材料。

因此，根据该光纤 60，实现了与上述实施例 5 所说明的光纤 30 相同的作用效果。

另外，可以是在气孔 61 中填充了空气的所有气孔，即使包括该情况，也可以在纤芯 62 中封入了光，高效抑制高次模式，即使扩大纤芯 62 的直径也可以维持单模条件。

另外，形成构成光子带隙的光子结晶的衍射晶格的气孔的排列可以将光封入到纤芯内，而使得从光纤的纤芯中心开始在半径方向上不传送光，若为周期性配置、即有规则的晶格状配置，则并不特别限定。

另外，气孔的形状并不限于圆柱（圆状的气孔），也可以为三棱

柱（三角形的气孔）、四棱柱（四边形状的气孔）、六棱柱（六边形状的气孔）等的形状，任何一个形状都可以实现基于光子带隙的导波构造。

实施例 9

5 根据图 16 到图 19 说明本发明的实施例 9 的光纤。另外，这时碲化物玻璃使用具有 $2\mu\text{m}$ 以上的零分散波长的权利要求 1 所述的玻璃。这里，使用上述表 1 所述的玻璃组成比中 No.1 和 No.6 之外的组成比尤其有效，进一步，如权利要求 3 所述的玻璃材料那样添加了稀土类的材料也有效。图 16 是表示了光纤的示意构造的直径方向的截面图，
10 图 17 是表示图 16 的光纤的等效折射率分布的曲线，图 18 是表示图 16 的光纤的分散特性的曲线，图 19 是表示图 16 的光纤的折射率分布的曲线。另外，本发明中，所谓等效折射率是指光实质上作用的折射率。

如图 16 所示，本发明的实施例 9 的光纤是由碲化物玻璃构成的光纤 100，包括纤芯部 101、配置为包围纤芯部 101、在纤芯部 101 的周围方向上具有多个沿纤芯部 101 的轴方向的圆形气孔 102a 的第一包层部 102、配置为包围第一包层部 102、具有与第一包层部 102 的等效折射率大致相等的折射率的第二包层部 103。
15

第一包层部 102 的气孔 102a 沿纤芯部 101 的周向以一定的间隔形成多个（本实施例中为 6 个）。第一包层部 102 的气孔 102a 在内部充满空气，折射率为大致等于真空的折射率 1 的大小。纤芯部 101 的折射率和第一包层部 102 的等效折射率是相对折射率差 (Δ) 为 2% 以上。第二包层部 103 使用与纤芯部 101 的碲化物玻璃组成不同的碲化物玻璃，为比纤芯部 101 的折射率低的折射率，同时，为与第一包层部 102 的等效折射率大致相等的折射率。
20

25 本发明的实施例 9 的光纤 100 中，设计为气孔 102a 的半径 r 为 $0.5 \sim 1.0$ 微米，气孔 102a 间的间距 γ 为 $1.0 \sim 2.0$ 微米，第一包层部 102 的半径 rr 为 3 微米以下。

另外，由于光纤 100 在轴方向上维持同一构造，所以若忽略由制作工序造成的形状波动，直径方向的截面构造在轴方向全长上相同，
30 不存在与轴方向垂直或斜交的构造。

在这种本发明的实施例 9 的光纤 100 中，通过将气孔 102a 一重地

配置在正六边形的顶点位置上，而形成第一包层部 102，由于在中心部的纤芯部 101 上不形成气孔 102a，所以该纤芯部 101 折射率最高，如图 17 所示，在纤芯部 101 上集中了光。

5 本发明的实施例 9 的光纤 100 中，如图 18 所示，可以看出在零分散波长中极性相反，在特定的波长区域中分散平坦。因此，根据本发明的实施例 9 的光纤 100，可以实现宽带的零分散波长区域。

如现有技术栏里已经描述的，近年来，开发了主要使用石英玻璃特意形成有气孔的光子晶体光纤（PCF）或中空光纤（HF）的光纤。该 PCF 和 HF 从导波原理来看分为两种。一种是通过光子带隙封入光的光子带隙型。其构造中，要求严格的周期性和气孔大小的均匀性。
10 另一种是通过从具有气孔的媒质的实际折射率差得到的全反射封入光的折射率导波型，在其构造中，不必要要求严格的周期性和气孔大小的均匀性。

例如，在上述的非专利文献 6 中，报道了实验上测量了由没有设置气孔的纤芯部和按六边形排列气孔的包层部的石英玻璃构成的光纤的分散特性的结果。由该非专利文献 6 所报道的光纤是 813nm 的波长的分散值约为 -77ps/km/nm 。例如，在非专利文献 13 中，算出由单一材料构成的光纤（PCF）的分散，报道了 PCF 的分散补偿效果。
15

因此，本发明人锐意研究的结果，发现通过使使用了碲化物玻璃的光纤为 PCF 和 HF 构造，可以解决上述问题。即，如前所述，本发明人确认了通过使在没有气孔 102a 的纤芯部 101 部分的折射率和第一包层部 102 的等效折射率的相对折射率差（ Δ ）为 2% 以上，同时，使第一包层部 102 的等效折射率和第二包层部 103 的折射率为同一程度，可以实现作为通信波段的 1.55 微米频带的宽带的零分散波长，且可以实现光的封入效果高的高非线性的光纤 100。另外，本发明人发现通过
20 气孔 102a 的大小和间隔等，可以将零分散波长和光的封入效果控制为宽范围。进一步，本发明人通过将用于纤芯部 101 的碲化物玻璃的组成不同的组成的碲化物玻璃用于第二包层部 103，可以实现低折射率。除此之外，本发明人通过在第二包层部 103 不形成气孔，可以低成本地进行容易地制造。
25
30

另外，专利文献 2 中，如图 20 所示，提出了通过在具有纤芯部 121

和包层部 122 的石英玻璃构成的光纤 120 上形成气孔 122a, 而在波长 1400~1800nm 中, 具有 +80ps/nm/km 以上的波长分散的分散补偿型的光纤, 该光纤 120 是为了减小光非线性特性, 将纤芯 121 的直径扩大为 20 μ m 左右, 同时, 纤芯 121 和包层 122 的相对折射率差 (Δ) 为 1 % 以下的低 Δ 构造。

与此相对, 本发明的实施例 9 的光纤 100 如前面所说明的, 目的是实现高非线性特性, 如图 19 所示, 通过将相对折射率差 Δ 提高到 2~4% 左右, 从纤芯 101 的直径具有小到 1~2 微米左右的构造来看, 构造, 目的与上述现有例的光纤 120 大大不同。

另外, 专利文献 3 中, 如图 21 所示, 提出了形成了三个或六个气孔 132a 的光纤, 使得纤芯部 131 和包层部 132 间的有效折射率差比 5 % 大。该光纤 130 由于由同一玻璃材料 (单一玻璃) 形成了纤芯部 131 和包层部 132 两者, 所以中心部的纤芯部 131 和气孔 132a 的外侧的包层部 132 的折射率相等, 一般具有称为 W 型的构造。但是, 本发明的实施例 9 的光纤 100 与先前所说明的相同, 构造与现有例的光纤 130 不同。

实施例 10

作为本发明的实施例 10, 例如, 如图 22、图 23 所示, 可以成为第一包层部 102 的气孔 102a 在第一包层部 102 的半径方向上形成多个 (双重形成) 的光纤 140、150。

另外, 作为本发明的实施例 10 的变形, 例如, 第一包层部 102 的气孔 102a 的直径方向的截面形状也可以为椭圆形和多边形。

实施例 11

作为本发明的实施例 11, 如图 24 所示, 例如, 通过在第一包层部 102 的气孔 102a 的内部嵌入具有比构成第二包层部 103 的碲化物玻璃的折射率低 Δn 的折射率的玻璃材料来进行填充, 还可以使第一包层部 102 的等效折射率和第二包层部 103 的折射率为同一程度。另外, 这时, 碲化物玻璃使用 2 μ m 以上具有零分散波长的权利要求 1 所述的玻璃。另外, 上述表 1 所述的玻璃组成比中使用 No.1 和 No.6 之外的组成比尤其有效, 进一步, 如权利要求 3 所述的玻璃材料那样, 添加了稀土类的材料也有效。

在这样构成的光纤 160 中，由于在气孔 102a 内不是空气，而填充了玻璃材料，所以与填充了空气的情况相比，可以使整体的机械强度提高，同时，在从预制坯来拔丝制造时，不仅可以容易地将气孔 102a 保持为一定形状，还可以减小散射损耗。

5 实施例 12

作为本发明的实施例 12，例如，如图 25 所示，为纤芯部 111 的折射率比第一包层部 102 的材料的折射率高的光纤 170，即，将没有形成气孔 102a 的轴中心部分作为折射率高了 Δn 的纤芯部(中心纤芯)111，还可以实施更强的光封入效果。另外，这时，碲化物玻璃使用具有 2 微米以上的零分散波长的权利要求 1 所述的玻璃。另外，表 1 所述的玻璃组成比中使用 No.1 和 No.6 以外的组成比尤其有效，进一步，如权利要求 3 所述的玻璃材料那样，添加了稀土类的材料也很有效。

另外，适当选择气孔 102a 的数目和形状等，使得第一包层部 102 的等效折射率与第二包层部 103 的折射率大致相等。

15 另外，本发明的光纤中，若具有由上述纤芯部和上述包层部的实际折射率差带来的全反射构造，则不需要必须满足严格的光子带隙条件和周期性和均匀性等的条件。

实施例 13

20 在下面的本发明的实施例 13~19 中，说明使用碲化物玻璃，来制作具有气孔 (air hole) 的光纤构造时的玻璃母材的制作方法。

本发明的实施例 13，作为在注入成型玻璃熔液时所使用的模具，使用在内壁的内侧形成了多个凸的部分的模具。通过将使用该模具成形的玻璃母材插入到由圆筒状的碲化物玻璃构成的套管中，而在玻璃母材和套管的间隙中形成气孔部。

25 图 26A—图 26E 表示本发明的实施例 13 的光子晶体光纤的制作方法。将热稳定性的指标 $T_x - T_g$ 为 300°C 以上的，熔融了表 1 所述的玻璃组成比中 No.19 的组成的玻璃原料的玻璃熔液 202 注入到预加热到 $300 \sim 400^\circ\text{C}$ 的模具 201 内 (图 26A)。模具 201 形成为在内壁的内侧形成 4 个凸的部分，所注入的玻璃母材截面为十字型。在玻璃熔液注入后，在 300°C 附近的温度下退火 10 小时以上，来制作玻璃母材 203 (图 26B)。这时，由于 4 分割模具 201，容易取出玻璃母材 203，所

以防止玻璃母材 203 的缺口、裂缝。与上述同样，在熔融玻璃原料，而将其流入到预加热到 300~400℃的圆筒状的模具（图中未示）后，通过将该模具原样保持为水平的高速旋转的离心浇铸（rotational casting），来制作圆筒状的套管 204（图 26C）。

5 在套管 204 内插入玻璃母材 203 后延伸（图 26D）。所延伸的母材 205 的截面准确对称。切出所延伸的母材 205 的线材直径一定的部分 206，并重新插入到其他套管（图中未示）后延伸。在玻璃母材 203 和套管的间隙中形成气孔（air hole）后，在延伸·拔丝时，加压孔形成的部分 208，而加压拔丝，使得维持或放大气孔。边调整拔丝张力，使得通过树脂覆盖的拉伸模（dice）前的值为 50g 以上，边拔丝加工为
10 外径为 110 微米（图 26E），来制作光子晶体光纤 207。

 本实施例的延伸工序中，在延伸加力为 200g 左右，进行加热，使得 10~20mm Φ 的母材为可延伸到 3~6mm Φ 的粘度的 $10^9 \sim 10^{10}$ P(泊(单位))。另一方面，为了通过现有的挤出法，从块玻璃加工为具有孔构造的母材，作为粘度，需要将块玻璃软化为 10^6 P(泊(单位))左右。因此，根据本实施例的方法，由于与挤出法比较，所加热的温度低，所以可以抑制结晶核的生长，适合于制作低损耗的光纤。
15

 图 27A 表示所制作的光子晶体光纤的截面图。光子晶体光纤 207 的外径为 110 微米，气孔的内径为 26 微米。图 27B 是相当于传送光的纤芯部分的放大图，纤芯直径为 2.6 微米。光输出为峰值的 $1/e^2$ 的截面积 A_{eff} 为 $3.54\mu\text{m}^2$ ，其 γ 值（表示非线性： $2\pi n^2/\lambda A_{\text{eff}}$ ）为 $675\text{W}^{-1}\text{km}^{-1}$ 。
20

 为了控制纤芯直径和气孔内径，可以通过变化套管 204 的壁厚，或增加延伸次数来进行。本实施例的光子晶体光纤的损耗在 1.55 微米下为 60dB/km，零分散波长从材料分散下的值 2.29 μm 移到 1.57 μm （参照图 28）。由于对称制作气孔的形状，所以不发生偏波依赖性。
25

 图 29 表示本实施例 13 的光子晶体光纤的纤芯直径和零分散波长的关系。若参照图 29，为了将零分散波长控制为 1.2~1.7 微米，需要将纤芯直径控制为 0.8~3.4 微米。另外，为了使零分散波长为 1.55 微米，需要纤芯直径为 2.45 微米。

30 图 30 表示使用了本实施例 13 的光子晶体光纤的波长转换装置的构成例。该波长转换装置具有在 1530~1560nm 的波段中以 100GHz 为

间隔输出 32 个波的 WDM 信号的光源 301~332 和输出 1565nm 的激励光的光源 333。进一步,具有合成光源 301~332 的输出的 AWG(Arrayed Waveguide Grating: 阵列波导光栅) 341 和合成所合成的 WDM 信号光 Es 和激励光 Ep 的光耦合器 342 和长度为 50m 的本实施例 13 的光子晶体光纤 343。通过这种构成,波长转换装置统一转换 32 个波的 WDM 信号的波长,而输出转换光 Ec。

图 31 表示上述波长转换装置的输出光谱。对于激励光 Ep 的功率 40mW,可以进行转换效率为-15dB,带宽 70nm 的波长统一转换。

实施例 14

本实施例 14 中,除了作为玻璃组成,使用 No.14,添加了 5000ppm Er 之外,作成与实施例 13 相同的光纤。

使用该光子晶体光纤,来制作与图 30 相同结构的波长转换装置。作为光源,使用在 1530~1560nm 的波段中在 100GHz 间隔输出 32 个波的 WDM 信号的光源 301~332 和输出 1480nm 的激励光和 1565nm 的激励光的光源 333。使用长度为 15m 的实施例 14 的光子晶体光纤 343,与信号放大同时进行波长统一转换。对 1480nm 的激励光的能量-50mW、1565nm 的激励光的能量 50mW,可以进行转换效率为 5dB,带宽 70nm 的波长统一转换。

另外,若将长度 15m 的本实施例 14 的光子晶体光纤适用于参照图 44 后述的非线性光纤环型反射镜(loop mirror),通过门光(gate light)的功率 10mW,可以重复对频率 80GHz、脉冲宽度 8ps 的高速调制后的信号光,进行信号光的开关。

图 37 表示使用了本实施例 14 的光子晶体光纤的参数光放大器。该参数光放大器将隔离器 1302、长度为 150m 的本实施例 14 的光子晶体光纤 1303 和光耦合器 1304 纵向连接到波长可变光源 1301 上。光耦合器 1304 中,经 EDFA 放大器 1306 从后方入射波长 1560nm、激励光能量 1.5W 的光源 1305 的输出。

图 38 表示上述参数光放大器的输出光谱。该输出光谱表示使用-30dBm 的信号光进行波长扫描测量的结果,在经过 1500~1620nm 的 120nm 的波段中得到了 20dB 以上的增益。

实施例 15

本发明的实施例 15 的方法制作由碲化物玻璃构成的圆柱状的玻璃块体，在玻璃块体的长边方向上由钻孔器开孔，来制作具有气孔部的玻璃母材。是将该玻璃母材插入到由圆筒状的碲化物玻璃构成的套管后拔丝的方法。

5 图 32A—图 32C 表示本发明的实施例 15 的光子晶体光纤的制作方法。前述的表 1 中，将熔融了热稳定性的指标 $T_x - T_g$ 为 300°C 以上的 No.15 的组成的玻璃原料的玻璃熔液注入到预先加热为 $300 \sim 400^\circ\text{C}$ 的模具内。注入后，在 300°C 附近的温度下退火 10 小时以上，来制作圆柱状的玻璃块体 601（图 32A）。在玻璃块体 601 的长边方向上用 3mm Φ 的钻孔器 602 开多个孔后，来制作玻璃母材 603（图 32B）。将玻璃母材 603 延伸加工到 3mm Φ ，切出所延伸的母材的线材直径一定的部分 604，来制作光子晶体光纤（图 32C）。

图 33 表示所制作的该光子晶体光纤的截面图。光子晶体光纤的外径为 110 微米，气孔直径 d 为 1.6 微米，气孔间距 Δ 为 2.3 微米， $d/\Delta = 0.7$ 。MFD（Mode Field Diameter：模式区域直径）为 3 微米，光纤的损耗在 1.55 微米下为 40dB/km，零分散波长为 1.55 微米。

将波长 1.55 微米、脉冲宽度 0.5ps、峰值功率 30W 的脉冲激励光入射到长度 150m 的该光子晶体光纤中。如图 34 所示，光子晶体光纤输出了经过了 1.7 微米频带（0.7~2.4 微米）的超连续光。

20 实施例 16

本发明的实施例 16 中，在注入成型玻璃熔液时所使用的模具中，从底面在内侧排列多个圆柱棒状的销体。注入成型后，通过迅速拔出预先加热的销体，而形成气孔部。

25 图 35A-图 35B 表示本发明的实施例 16 的光子晶体光纤的制作方法。将所述的表 1 中，熔融了热稳定性的指标 $T_x - T_g$ 为 180°C 的 No.9 的组成的玻璃原料的玻璃熔液 802 注入到预先加热为 $300 \sim 400^\circ\text{C}$ 的模具 801a、801b（下面，统一标记表示为 801）（图 35A）。在模具 801 的底面设置从基台 804 在内侧排列了多个圆柱棒状的销体 805 的钻模（jig）。在将玻璃熔液 802 注入成型到模具 801 上后，通过快速拔出销体 805，来制作形成了气孔的玻璃母材 803（图 35B）。

通过使用玻璃母材 803，与上述的实施例 15 相同，进行延伸·拔

丝，来制作光子晶体光纤。所制作的光子晶体光纤的截面与图 33 相同，外径为 120 微米，气孔直径 d 为 1.5 微米，气孔间距 Δ 为 2.3 微米， $d/\Delta=0.65$ 。MFD 是 2.5 微米，光纤的损耗在 1.55 微米下为 65dB/km，零分散波长为 1.55 微米。

5 将波长 1.55 微米、脉冲宽度 0.5ps、峰值功率为 30W 的脉冲激励光入射到长度为 50m 的该光子晶体光纤中。在脉冲受到孤子效应(soliton effect)的同时，观测到随着在光纤内传送，脉冲光谱向长波长侧偏移（孤子自相位移位）。

10 图 36 表示使用了本实施例 16 的光子晶体光纤的波长可变脉冲光源。该光源是通过使入射脉冲的峰值功率变化，利用了光谱位移量变化效果的波长可变脉冲光源。波长可变脉冲光源将光放大器 902、长度 50m 的本实施例 16 的光子晶体光纤 903 和可编程 PLC(planer lightwave circuit: 平面光路) 合频分频器 904 纵向连接到以 10GHz 调制的脉冲光源 901 上。

15 进一步，将光放大器 905 和长度 50m 的本实施例 16 的光子晶体光纤 906 纵向连接到可编程 PLC 合频分频器(multi-demultiplexer: 复用解复用器)904 的输出上。通过这种结构，波长可变脉冲光源以 10~100Gbit/s 的信道发送速率，以波长可变范围为 150nm(1550~1700nm)，输出光脉冲。

20 使用该光子晶体光纤，而制作与图 30 相同结构的波长转换装置。作为光源，使用在 1530~1560nm 的波段中在 100GHz 间隔输出 32 个波的 WDM 信号的光源 301~332 和输出 1480nm 的激励光和 1565nm 的激励光的光源 333。使用长度 15m 的实施例 16 的光子晶体光纤 343，在信号放大的同时，进行波长统一转换。对 1480nm 的激励光的功率
25 50mW、1565nm 的激励光的功率 50mW，可以进行转换效率为 5dB，带宽 70nm 的波长统一转换。

另外，若将长度 15m 的本实施例 16 的光子晶体光纤适用于参照图 44 的后述非线性光纤环型反射镜中，通过门光的功率 10mW，可以对频率 80GHz、脉冲宽度 8ps 的高速调制后的信号光重复进行信号光的
30 开关切换。

图 37 表示使用了本实施例 16 的光子晶体光纤的参数光放大器。

该参数光放大器将隔离器 1302、长度为 150m 的本实施例 16 的光子晶体光纤 1303 和光耦合器 1304 纵向连接到波长可变光源 1301 上。光耦合器 1304 中，经 EDFA 放大器 1306 从后方入射波长 1560nm、激励光功率 1.5W 的光源 1305 的输出。

5 图 38 表示上述参数光放大器的输出光谱。该输出光谱表示使用 -30dBm 的信号光进行波长扫描测量的结果，在跨越 1500~1620nm 的 120nm 的波段中得到了 20dB 以上的增益。

实施例 17

10 本发明的实施例 17 中，不由单一组成的碲化物玻璃构成光子晶体光纤，进一步由折射率不同的组成形成纤芯/包层构造。

进一步，本发明的实施例 17 中，在注入成型玻璃熔液时所使用的模具的下部放大加工为圆锥状。使用该模具以包层和纤芯的顺序注入，通过包层玻璃的体积收缩来制作将纤芯玻璃吸入成型为圆锥状的母材。这时，模具上部由于内壁向内侧为凸，吸入纤芯玻璃的区域小，
15 所以为了高效吸入纤芯，需要注入温度等的最佳化。

图 39A-图 39B 和图 40A—图 40B 表示本发明的实施例 17 的光子晶体光纤的制作方法。纤芯玻璃使用上述的表 1 的 No.18 的组成，添加 4000ppm 的 Tm。包层玻璃使用上述的表 1 的 No.17 的组成。模具 1501 与上述的图 26A 所示的模具相同，在内壁的内侧形成多个凸的部分，向其底部放大加工为圆锥状(图 39A)。将模具 1501 预加热到 300~
20 400℃，以包层的玻璃熔液 1502、纤芯的玻璃熔液 1503 的顺序注入，通过包层玻璃的体积收缩来制作将纤芯玻璃吸入成型为圆锥状的玻璃母材 1504 (图 39B)。纤芯玻璃的吸入长度为 15mm。

使用玻璃母材 1504，进行与前述的实施例 13 相同的延伸·拔丝加工，来制作光子晶体光纤 1505。图 40A 表示该光子晶体光纤 1505 的
25 截面图。光子晶体光纤 1505 的外径为 110 微米、气孔内径为 35 微米、十字的中心部分为 2.4 微米、添加了 Tm 的纤芯直径为 1.5 微米。MFD 为 2.9 微米、光纤的损耗在 1.55 微米下为 30dB/km，作为纤芯通过导入与包层不同的玻璃成份，与没有纤芯/包层构造的情况相比，可低损耗。零分散波长为 1.52 微米。
30

若使用市售的熔融连接器将本实施例 17 的光子晶体光纤与石英光

纤(比折射率4%、MFD3微米)连接,则可以在0.2dB的损耗和-50dB以下的反射衰减量下进行连接。为了进行比较,若将所述的实施例13的单一组成的光子晶体光纤与上述石英光纤连接,则由于纤芯形状变为不完整,所以为2dB的损耗、-19dB的反射衰减量。

5 使用20m本实施例17的光子晶体光纤,适用于所述的图30所示的波长转换装置。波长转换装置用AWG341合成的WDM信号光Es是在1480~1510nm的波段上以100GHz的间隔多路复用了32个波的WDM信号的信号。激励光Ep是用于Tm的激励的1410nm的激励光和用于波长转换和Tm的激励两者的1520nm的激励光。波长转换装置
10 在进行信号放大同时,统一转换32个波的WDM信号的波长,而输出转换光Ec。并且,波长转换装置可以对1420nm的激励光的能量50mW、波长转换的激励光的能量50mW,进行转换效率5dB、带宽70nm的波长统一转换。

实施例18

15 本发明的实施例18中,与上述的实施例17相比较,为了使纤芯的吸入变得容易,而设置在模具下部的圆锥状部分的底注入玻璃后开孔的机构。通过向该孔漏出玻璃,起到与玻璃的收缩的配合效果。通过抽成真空,使得向该孔漏出玻璃,而起到与玻璃的收缩的配合效果。

 图41A—图41C表示本发明的实施例18的光子晶体光纤的制作方法。纤芯玻璃使用前述的表1的No.20的组成,包层玻璃使用前述的
20 表1的No.21的组成。模具1601与前述的图39A所示的模具相同,在内壁的内侧形成多个凸的部分,并向底部扩大加工为圆锥状(图41A)。进一步,在模具1601的底部分设置基台1602,通过使基台1602的中央的可动部件1603滑动,而在模具1601的底的部分上具有可为贯通
25 的孔的形状(图41B)。

 将模具1601预加热到300~400℃,将基台1602另外预加热到350~450℃,而以包层的玻璃熔液1604、纤芯的玻璃熔液1605的顺序注入(图41A)。通过包层玻璃的体积收缩和在底面开孔(图41B),包层玻璃的中心部流出,而可以得到通过吸入包层玻璃成型的玻璃母材1606(图41C)。纤芯的吸入长度为25mm。
30

 使用这样成型的玻璃母材1606,进行与上述的实施例13相同的延

伸·拔丝加工，来制作光子晶体光纤。该光子晶体光纤的构造与前述的图 40A 相同，光纤的外径为 115 微米、气孔内径为 20 微米，十字的中心部分为 2.8 微米，纤芯直径为 1.2 微米。MDF 为 2.5 微米，光纤的损耗在 1.55 微米下为 25dB/km，零分散波长为 1.55 微米。

5 图 42 表示使用了本实施例 18 的光子晶体光纤的光克尔快门实验系统。光克尔快门实验系统包括输出波长 1552nm 的控制光的 DFB-LD (distributed feedback laser diode: 分配式反馈激光二极管) 1701、输出波长 1535nm 的信号光的 DFB-LD1702、放大控制光的 Er 掺杂光纤放大器 1703，将这些控制光和信号光输入到长度为 10m 的本实施例
10 18 的光子晶体光纤 1704 中，使得偏波方向彼此成 45 度的角度。从光子晶体光纤 1704 的输出分路信号光，而经偏振器 (polarizer) 1705 输入到超高速扫描摄像机 (streak camera) 1706 中。

通过这种结构，在没有入射控制光的情况下，在信号光的偏波为某一定方向下在光子晶体光纤 1704 中传送，而由偏振器 1705 截断。
15 另一方面，在入射了控制光的情况下，通过光子晶体光纤 1704 的非线性折射率效果，信号光的偏波成份变化，透过偏振器 1705。这样，可以切换宽度 8ps 的信号光脉冲。

实施例 19

本发明的实施例 19 中，为了使纤芯的吸入变得容易，设置在向模具下部的圆锥状部分的底注入了玻璃后开孔的结构，通过抽成真空，
20 而使玻璃向该孔漏出，而起到与玻璃的收缩的配合效果。

另外，本发明的实施例 19 在加压拔丝，使得保持或放大在母材上形成的气孔时，通过使拔丝的张力为 50g 以上，而可以使孔的形成和孔径的控制变得容易。

25 图 43A—图 43C 表示本发明的实施例 19 的光子晶体光纤的制作方法。纤芯玻璃使用前述的表 1 的 No.13 的组成，包层玻璃使用前述的表 1 的 No.16 的组成。模具 1801 与图 39A 所示的模具相同，在内壁的内侧形成多个凸的部分，而将下部扩大加工为圆锥状 (图 43A)。进一步，在模具 1801 的底的部分设置基台 1802，通过使基台 1802 中央
30 的可动部件 1803 滑动，而可在模具 1801 的底的部分形成孔 (图 43B)。使用该孔，而从模具 1801 下进行真空抽气。

将模具 1801 预加热为 $300\sim 400^{\circ}\text{C}$ ，将基台 1802 另外预加热为 $350\sim 450^{\circ}\text{C}$ ，而以包层的玻璃熔液 1804、纤芯的玻璃熔液 1805 的顺序注入（图 43A）。通过包层玻璃的体积收缩和从底面的孔中进行抽真空（图 43B），包层玻璃的中心部流出，吸入纤芯玻璃，而可得到成型后的玻璃母材 1806（图 43C）。纤芯的吸入长度为 50mm。

使用玻璃母材 1806，进行与前述的实施例 13 相同的延伸・拔丝加工，来制作光子晶体光纤。该光子晶体光纤的结构与图 40A、图 40B 相同，光纤的外径为 120 微米、气孔内径为 28 微米、十字的中心部分为 2.6 微米、纤芯直径为 1.3 微米。MFD 为 2.3 微米、光纤的损耗在 1.55 微米下为 28dB/km，零分散波长为 1.56 微米。

图 44 表示使用了本实施例 19 的光子晶体光纤的非线性光纤环型反射镜。非线性光纤环型反射镜纵向连接输入门光的光耦合器 1901、长度为 15m 的本实施例 19 的光子晶体光纤 1902、输出门光的光耦合器 1903 和输入输出信号光的光耦合器 1904 而构成环。

信号光由光耦合器 1904 进行二分路，并在光子晶体光纤 1902 上沿顺方向和反方向传送。信号光再次输入到光耦合器 1904 中，彼此干扰后输出。这时，通过从光耦合器 1901 输入的门光，控制光子晶体光纤 1902 的信号光的相位变化来进行开关转换。通过门光的功率 200mW，可以重复进行频率 80GHz、脉冲宽度 8ps 的高速调制后的信号光的切换。

使用与前述的图 26A—图 26E 所示的实施例 13 相同的制作方法，在插入前述的表 1 的 No.11 的组成的套管后，进行到延伸工序。本实施例 19 中，使对气孔的加压为一定，并调整拔丝张力，使得通过覆盖树脂的拉伸模之前的值为 50g 以上。如图 27A—图 27B 所示那样，光子晶体光纤的外径为 110 微米。对用该方法所制作的光纤 #1（1000m）和在拔丝张力为 30g 下所加工的光纤 #2（1000m），比较气孔内径的长边方向的稳定性。

光纤 #1 对于气孔内径的设计值 26 微米，误差为 ± 5 微米。实际可使用的 26 微米 ± 1 微米以内的部位是整体的 70%，短的部分也可采用 50m 以上。另一方面。光纤 #2 气孔内径对于设计值的 26 微米误差有 ± 20 微米。实际可使用的 26 微米 ± 1 微米以内的部位是整体的 20

%, 可采用 50m 以上的部分达到了几个。

从以上的比较可以看出, 在可使气孔的大小与设计值匹配、而保持一定的拔丝工序中, 通过将拔丝张力设定为树脂覆盖的拉伸模前的值 50g 以上是重要的。另外, 在其他光子晶体光纤的拔丝工序中, 该
5 设定也是重要的。光纤 #1 的十字中心部分为 2.6 微米。MFD 为 2.4 微米, 光纤的损耗在 1.55 μm 下为 24dB/km, 零分散波长为 1.56 微米。

图 45 表示使用了本发明的实施例 19 的光子晶体光纤的时钟再现装置。WDM 传送系统的时钟再现装置 2003 由时钟再现部 2201 接收从
10 输入发送机 2001 发送的 WDM 信号的波长选择滤波器 2002 所选的一个波长信号, 而抽出 RF 时钟。将所抽出的时钟用时钟再现部 2201 内的模式锁定光纤激光器再现为光脉冲后, 用 EDFA2204 放大该光脉冲后, 入射到长度为 30m 的本实施例 19 的光子晶体光纤 2203 中。将由光子晶体光纤 2203 产生的跨越 1.5~1.6 微米的 100nm 带宽的超连续光输入到 AWG2204 中, 通过由 AWG2204 进行滤波, 而可再现由单信道的
15 时钟再现波长多路复用后的信道部分的时钟脉冲。

将任意一个信道的时钟脉冲入射到使用了长度为 50m 的本实施例 19 的光子晶体光纤的非线性环型反射镜 2004 中。将从发射机 2001 发送的 WDM 信号对应的信道作为门光, 入射到非线性环型反射镜 2004 中, 而可以实现恢复劣化后的信号质量的光 3R 再现。

20 在上面的实施例 13~19 中, 虽然在模具内壁的内侧形成多个凸的部分, 并制作了 4 个气孔 (air hole), 但是该气孔的个数并不限于此。另外, 使用了本光纤的光设备是将本光纤作为高非线性光纤使用的光设备, 并不限于上述实施例 13~19。

如上面所说明的, 在本发明的实施例 13~19 的光纤的制造方法中,
25 通过注入成型或压缩成型来制作玻璃母材。因此, 任何一个成型方法与现有的挤出法比较, 都缩短了对玻璃母材的加热工序的时间, 所以可以抑制玻璃中的结晶化, 可以制作低损耗的光纤。

实施例 20

在下面说明的本发明的实施例 20~31 中, 公开了在碲化物玻璃制
30 的光纤的中心附近配置多个气孔, 通过由气孔所包围的区域的大小, 来控制光纤的分散特性的方法。

图 46 表示本发明的实施例 20 的光纤的截面结构。在插入到套管 2104 的零材料分散波长为 2.08 微米的碲化物玻璃 2101 上形成 4 个气孔 2103a~2103d (下面, 统一标记表示为 2103), 在各个气孔 2103 中充满空气, 其折射率大致等于 1。由这 4 个气孔 2103 所围的部分是
5 传送光的纤芯的区域 2102。碲化物玻璃 2101 的外径是 2100 微米、气孔 2103 的内径是 40 微米, 纤芯直径为 4.5 微米。光输出为峰值的 $1/e^2$ 的截面积 A_{eff} 是 $4.1\mu\text{m}^2$, 其 γ 值是 $590\text{W}^{-1}\text{km}^{-1}$ 。

本实施例 20 的光子晶体光纤的制作工序与前述的图 26A—24E 所示的制作工序相同。虽然为重复说明, 但是为了注意, 参照图 26A—
10 图 24E, 说明本实施例 20 的光子晶体光纤的制作方法。将熔融了碲化物玻璃原料的玻璃熔液 202 注入到预加热到 $300\sim 400^\circ\text{C}$ 的模具 201 内 (图 26A)。模具 201 在内壁的内侧形成 4 个凸的部分, 形成为所注入的玻璃母材截面为十字型。在玻璃熔液注入后, 在 300°C 附近的温度下退火 10 小时以上, 来制作玻璃母材 203 (图 26B)。这时, 由于 4
15 分割上述模具 201, 容易取出玻璃母材 203, 所以可以防止玻璃母材 203 的缺口、裂缝。与上述同样, 在熔融玻璃原料, 而将其流入到预先加热到 $300\sim 400^\circ\text{C}$ 的圆筒状的模具 (图中未示) 后, 通过将该模具保持为水平不动的高速旋转的离心浇铸法, 来制作圆筒状的套管 204 (图 26C)。

20 在套管 204 内插入玻璃母材 203 后延伸 (图 26D)。所延伸的母材 205 的截面准确对称。切出所延伸的母材 205 的线材直径的一定的部分 206, 并重新插入到其他套管 (图中未示) 后延伸。在玻璃母材 203 和套管的间隙中形成气孔 (air hole) 后, 在延伸·拔丝时, 加压形成孔的部分 208, 而加压拔丝, 使得维持或放大气孔。边调整拔丝张力,
25 使得通过树脂覆盖的拉伸模前的值为 50g 以上, 边拔丝加工为外径为 105 微米 (图 26E), 边制作光子晶体光纤 207。

本实施例 20 的延伸工序中, 在延伸加力为 200g 左右中, 进行加热, 使得 $10\sim 20\text{mm}\Phi$ 的母材为可延伸到 $3\sim 6\text{mm}\Phi$ 的粘度的 $10^9\sim 10^{10}\text{P}$ (泊(单位))。另一方面, 为了通过现有的挤出法, 从块玻璃加工为
30 具有孔构造的母材, 作为粘度, 需要将块玻璃软化为 10^6P (泊(单位)) 左右。因此, 根据本实施例的方法, 由于与现有的挤出法比较, 所加

热的温度低，所以可以抑制结晶核的生长，适合于制作低损耗的光纤。

图 47 表示本实施例 20 的光纤的光电场分布。该光电场分布是使用了作为数值算法之一的差分法求出的光电场分布。电场每变化 10%，引一条等高线来表示。实施例 20 的光纤从计算结果可以看出，将光封入到中央的纤芯区域 2102，光沿着纤芯传送。若在截断·研磨光纤后，观察近视野像（NFP）和远视野像（FFP），则可以确认光封入了光纤中心部，为单模化。

图 48 表示本实施例 20 的光纤的波长分散。实施例 20 的光纤的零分散波长 λ_0 波长为 1.56 微米。

10 实施例 21

图 49 表示本发明的实施例 21 的光纤。在插入到套管 2304 的前述表 1 的 No.15 的组成的碲化物玻璃 2301 上形成 4 个气孔 2303a~2303d（统一标记表示为 2303），这些气孔 2303 充满空气，其折射率大致等于 1。由 4 个气孔 2303 包围的部分是传送光的纤芯区域 2302。在区域 2302 的内部，嵌入使碲化物玻璃的组成变化、零材料分散波长为 2.1 微米、相对碲化物玻璃 2301 相对折射率差高 1.1% 的折射率的碲化物玻璃 2305。本实施例 21 中，通过毛细管法（capillary method；毛细管法）来制作光纤。碲化物玻璃 2301 的外径是 110 微米，气孔 2303 的内径是 35 微米，纤芯直径为 3.0 微米。光输出为峰值的 $1/e^2$ 的截面积 A_{eff} 为 $2.6\mu\text{m}^2$ ，其 γ 值是 $940\text{W}^{-1}\text{km}^{-1}$ 。

图 50 表示本实施例 21 的光纤的光电场分布。该光电场分布是使用了作为数值算法之一的差分法求出的光电场分布。电场每变化 10%，引一条等高线来表示。实施例 21 的光纤从计算结果可以看出，将光封入到中央的纤芯区域 2302，光沿着纤芯传送。若在截断·研磨光纤后，观察近视野像（NFP）和远视野像（FFP），则可以确认光封入光纤中心部，为单模化。

图 51 表示本实施例 21 的光纤的波长分散。实施例 21 的光纤的零分散波长 λ_0 波长为 1.30 微米。

实施例 22

图 52 表示本发明的实施例 22 的光纤。在插入到套管 2404 中的前述表 1 的 No.18 的组成的碲化物玻璃 2401 中形成 4 个气孔 2403a~

2403d（统一标记为 2403），在这些气孔 2403 中充满空气，其折射率大致等于 1。由这 4 个气孔 2403 所包围的部分是传送光的为纤芯的区域 2402。在区域 2402 的内部嵌入碲化物玻璃的组成变化、零材料分散波长在 2.05 微米相对碲化物玻璃 2401 相对折射率差低 2.2% 的折射率的碲化物玻璃 2405。本实施例 22 中，通过毛细管法来制作光纤。碲化物玻璃 2401 的外径是 90 微米、气孔 2403 的内径是 45 微米，纤芯直径为 2.7 微米。光输出为峰值的 $1/e^2$ 的截面积 A_{eff} 为 $2.5\mu\text{m}^2$ ，其 γ 值是 $930\text{W}^{-1}\text{km}^{-1}$ 。

图 53 表示本实施例 22 的光纤的光电场分布。该光电场分布是使用了作为数值算法之一的差分法求出的光电场分布。电场每变化 10%，引一条等高线来表示。实施例 22 的光纤从计算结果可以看出，将光封入到中央的纤芯区域 2402，光沿着纤芯传送。若在截断·研磨光纤后，观察近视野像（NFP）和远视野像（FFP），则可以确认光封入光纤中心部，为单模化。

图 54 表示本实施例 22 的光纤的波长分散。实施例 22 的光纤的零分散波长 λ_0 波长为 1.52 微米。

实施例 23

图 55 表示本发明的实施例 23 的光纤。在插入到套管 2504 中的前述的表 1 的 No.17 的组成的碲化物玻璃 2501 中形成 4 个气孔 2503a~2503d（统一标记为 2503），在这些气孔 2503 中充满空气，其折射率大致等于 1。由这 4 个气孔 2503 所包围的部分是传送光的为纤芯的区域 2502。在区域 2502 的内部设置中心气孔 2505。本实施例 23 中，通过毛细管法来制作光纤。碲化物玻璃 2501 的外径是 105 微米、气孔 2503 的内径是 40 微米，纤芯直径为 3.1 微米。光输出为峰值的 $1/e^2$ 的截面积 A_{eff} 为 $2.8\mu\text{m}^2$ ，其 γ 值是 $810\text{W}^{-1}\text{km}^{-1}$ 。

图 56 表示本实施例 23 的光纤的光电场分布。该光电场分布是使用了作为数值算法之一的差分法求出的光电场分布。电场每变化 10%，引一条等高线来表示。实施例 23 的光纤从计算结果可以看出，将光封入到中央的纤芯区域 2502，光沿着纤芯传送。若在截断·研磨光纤后，观察近视野像（NFP）和远视野像（FFP），则可以确认光封入光纤中心部，为单模化。

图 57 表示本实施例 23 的光纤的波长分散。实施例 23 的光纤的零分散波长 λ_0 波长为 1.41 微米。

实施例 24

图 58 表示本发明的实施例 24 的光纤。在插入到套管 2604 中的前述的表 1 的 No.14 的组成的碲化物玻璃 2601 中形成 3 个气孔 2603a~2603c (统一标记为 2603)，在这些气孔 2603 中充满空气，其折射率大致等于 1。由 3 个气孔 2603 所包围的部分是传送光的为纤芯的区域 2602。本实施例 24 中，通过挤出法来制作光纤。碲化物玻璃 2601 的外径是 110 微米、气孔 2603 的内径是 40 微米，纤芯直径为 5.5 微米。光输出为峰值的 $1/e^2$ 的截面积 A_{eff} 为 $4.5\mu\text{m}^2$ ，其 γ 值是 $520\text{W}^{-1}\text{km}^{-1}$ 。

在截断·研磨光纤后，观察近视野像 (NFP) 和远视野像 (FFP)，则可以确认光封入光纤中心部，为单模化。

图 59 表示本实施例 24 的光纤的波长分散。实施例 24 的光纤的零分散波长 λ_0 波长为 1.65 微米。

实施例 25

图 60 表示本发明的实施例 25 的光纤。在插入到套管 2704 中的前述的表 1 的 No.16 的组成的碲化物玻璃 2701 中形成 4 个气孔 2703a~2703d (统一标记为 2703)，在这些气孔 2703 中充满空气，其折射率大致等于 1。由 4 个气孔 2703 所包围的部分是传送光的为纤芯的区域 2702。本实施例 25 中，通过挤出法来制作光纤。碲化物玻璃 2701 的外径是 110 微米、气孔 2703 的内径是 40 微米，纤芯直径为 2.2 微米。光输出为峰值的 $1/e^2$ 的截面积 A_{eff} 为 $2.0\mu\text{m}^2$ ，其 γ 值是 $1200\text{W}^{-1}\text{km}^{-1}$ 。

在截断·研磨光纤后，观察近视野像 (NFP) 和远视野像 (FFP)，则可以确认光封入光纤中心部，为单模化。

图 61 表示本实施例 25 的光纤的波长分散。实施例 25 的光纤的零分散波长 λ_0 波长为 1.22 微米。

实施例 26

图 62 表示本发明的实施例 26 的光纤。在插入到套管 2804 中的前述的表 1 的 No.18 的组成的碲化物玻璃 2801 中形成 5 个气孔 2803a~2803e (统一标记为 2803)，在这些气孔 2803 中充满空气，其折射率大致等于 1。由 5 个气孔 2803 所包围的部分是传送光的为纤芯的区域

2802。在区域 2802 的内部嵌入使碲化物玻璃的组成变化、零材料分散
波长在 2.1 微米相对碲化物玻璃 2801 相对折射率差高 1.1% 的折射率的
碲化物玻璃 2805。本实施例 26 中，通过挤出法来制作光纤。碲化物玻
璃 2801 的外径是 110 微米、气孔 2803 的内径是 40 微米，纤芯直径为
5 4.1 微米。碲化物玻璃 2805 的直径是 1.0 微米。光输出为峰值的 $1/e^2$
的截面积 A_{eff} 为 $3.5\mu\text{m}^2$ ，其 γ 值是 $680\text{W}^{-1}\text{km}^{-1}$ 。

在截断·研磨光纤后，观察近视野像（NFP）和远视野像（FFP），
则可以确认光封入光纤中心部，为单模化。

图 63 表示本实施例 26 的光纤的波长分散。实施例 26 的光纤的零
10 分散波长 λ_0 波长为 1.61 微米。

实施例 27

图 64 表示本发明的实施例 27 的光纤。在插入到套管 2904 中的前
述的表 1 的 No.12 的组成的碲化物玻璃 2901 中形成 6 个气孔 2903a~
2903f（统一标记为 2903），在这些气孔 2903 中充满空气，其折射率
15 大致等于 1。由 6 个气孔 2903 所包围的部分是传送光的为纤芯的区域
2902。在区域 2902 的内部嵌入使碲化物玻璃的组成变化、零材料分散
波长在 2.15 微米相对碲化物玻璃 2901 相对折射率差低 1.5% 的折射率
的碲化物玻璃 2905。本实施例 27 中，通过挤出法来制作光纤。碲化物
玻璃 2901 的外径是 110 微米、气孔 2903 的内径是 40 微米，纤芯直径
20 为 3.5 微米。碲化物玻璃 2905 的直径是 1.5 微米。光输出为峰值的 $1/e^2$
的截面积 A_{eff} 为 $3.4\mu\text{m}^2$ ，其 γ 值是 $670\text{W}^{-1}\text{km}^{-1}$ 。

在截断·研磨光纤后，观察近视野像（NFP）和远视野像（FFP），
则可以确认光封入光纤中心部，为单模化。

图 65 表示本实施例 27 的光纤的波长分散。实施例 27 的光纤的零
25 分散波长 λ_0 波长为 1.70 微米。

实施例 28

图 66 表示本发明的实施例 28 的光纤。在插入到套管 3004 中的前
述的表 1 的 No.10 的组成的碲化物玻璃 3001 中形成 3 个气孔 3003a~
3003c（统一标记为 3003），在这些气孔 3003 中充满空气，其折射率
30 大致等于 1。由 3 个气孔 3003 所包围的部分是传送光的为纤芯的区域
3002。

图 67 表示为图 66 的光纤的纤芯区域的放大图。本实施例 28 中，通过超声波钻孔法（ultrasonic drilling）来制作光纤。碲化物玻璃 3001 的外径是 100 微米、气孔 3003 的内径是 35 微米，纤芯直径为 5.5 微米。气孔 3005 的直径是 0.5 微米。光输出为峰值的 $1/e^2$ 的截面积 A_{eff} 为 3.0 μm^2 ，其 γ 值是 $780\text{W}^{-1}\text{km}^{-1}$ 。

在截断·研磨光纤后，观察近视视野像（NFP）和远视野像（FFP），则可以确认光封入光纤中心部，为单模化。

图 68 表示由本实施例 28 得到的光纤的零分散波长和纤芯大小的关系。可以看出为了使零分散波长收敛于 1.2 微米～1.7 微米频带内，也可以将由气孔包围、封入光的纤芯区域的大小、即，纤芯直径 a 控制为 0.6 微米～6.5 微米的范围。

实施例 29

图 69 表示本发明的实施例 29 的光纤。在插入到套管 3104 中的前述的表 1 的 No.11 的组成的碲化物玻璃 3101 中形成 4 个气孔 3103a～3103d，在这些气孔 3103 中充满空气，其折射率大致等于 1。由 4 个气孔 3103 所包围的部分是传送光的为纤芯的区域 3102。

图 70 表示为图 69 的光纤的纤芯区域的放大图。本实施例 29 中，通过超声波钻孔法来制作光纤。碲化物玻璃 3101 的外径是 125 微米、气孔 3103 的内径是 50 微米，纤芯直径为 3.5 微米。光输出为峰值的 $1/e^2$ 的截面积 A_{eff} 为 3.2 μm^2 ，其 γ 值是 $770\text{W}^{-1}\text{km}^{-1}$ 。

在截断·研磨光纤后，观察近视视野像（NFP）和远视野像（FFP），则可以确认光封入光纤中心部，为单模化。

图 71 表示由本实施例 29 得到的光纤的零分散波长和纤芯大小的关系。可以看出为了使零分散波长收敛于 1.2 微米～1.7 微米频带内，也可以将由气孔包围、封入光的纤芯区域的大小、即，纤芯直径 a 控制为 0.6 微米～5.0 微米的范围。

实施例 30

图 72 表示本发明的实施例 30 的光纤。在插入到套管 3204 中的前述的表 1 的 No.17 的组成的碲化物玻璃 3201 中形成 5 个气孔 3203a～3203e（统一标记为 3203），在这些气孔 3203 中充满空气，其折射率大致等于 1。由 5 个气孔 3203 所包围的部分是传送光的为纤芯的区域

3202。

图 73 表示为图 72 的光纤的纤芯区域的放大图。在区域 3202 的内部嵌入使碲化物玻璃的组成变化、零材料分散波长在 2.2 微米下相对碲化物玻璃 3201 相对折射率差高 1.1% 的折射率的碲化物玻璃 3205。本
5 实施例 30 中，通过挤出法来制作光纤。碲化物玻璃 3201 的外径是 80 微米、气孔 3203 的内径是 35 微米，纤芯直径为 3.9 微米。碲化物玻璃 3205 的直径是 1.0 微米。光输出为峰值的 $1/e^2$ 的截面积 A_{eff} 为 $3.4\mu\text{m}^2$ ，其 γ 值是 $690\text{W}^{-1}\text{km}^{-1}$ 。

在截断·研磨光纤后，观察近视野像（NFP）和远视野像（FFP），
10 则可以确认光封入光纤中心部，为单模化。

图 74 表示由本实施例 30 得到的光纤的零分散波长和纤芯大小的关系。可以看出为了使零分散波长收敛于 1.2 微米~1.7 微米频带内，也可以将由气孔包围、封入光的纤芯区域的大小、即，纤芯直径 a 控制为 0.4 微米~5.0 微米的范围。

15 实施例 31

图 75 表示本发明的实施例 31 的光纤。在插入到套管 3304 中的前述的表 1 的 No.17 的组成的碲化物玻璃 3301 中形成 6 个气孔 3303a~3303f（统一标记为 3303），在这些气孔 3303 中充满空气，其折射率大致等于 1。由这 6 个气孔 3303 所包围的部分是传送光的为纤芯的区域
20 3302。

图 76 表示为图 75 的光纤的纤芯区域的放大图。在区域 3302 的内部嵌入使碲化物玻璃的组成变化、零材料分散波长在 2.3 微米下相对碲化物玻璃 3301 相对折射率差低 1.5% 的折射率的碲化物玻璃 3305。本
25 实施例 31 中，通过挤出法来制作光纤。碲化物玻璃 3301 的外径是 95 微米、气孔 3303 的内径是 50 微米，纤芯直径为 3.0 微米。碲化物玻璃 3305 的直径是 1.5 微米。光输出为峰值的 $1/e^2$ 的截面积 A_{eff} 为 $3.5\mu\text{m}^2$ ，其 γ 值是 $680\text{W}^{-1}\text{km}^{-1}$ 。

在截断·研磨光纤后，观察近视野像（NFP）和远视野像（FFP），
则可以确认光封入光纤中心部，为单模化。

30 图 77 表示由本实施例 31 得到的光纤的零分散波长和纤芯大小的关系。可以看出为了使零分散波长收敛于 1.2 微米~1.7 微米频带内，

也可以将由气孔包围、封入光的纤芯区域的大小、即，纤芯直径 a 控制为 0.3 微米~4.0 微米的范围。

产业上的可用性

5 本发明的光纤和根据其制作方法所制作的非线性光纤在光通信系统中对高性能化、大容量化、低价格化的发展很有效，结果，可以大大有助于使用了这些系统的服务的高度化、经济化，可以极其有益地用于光通信产业中。

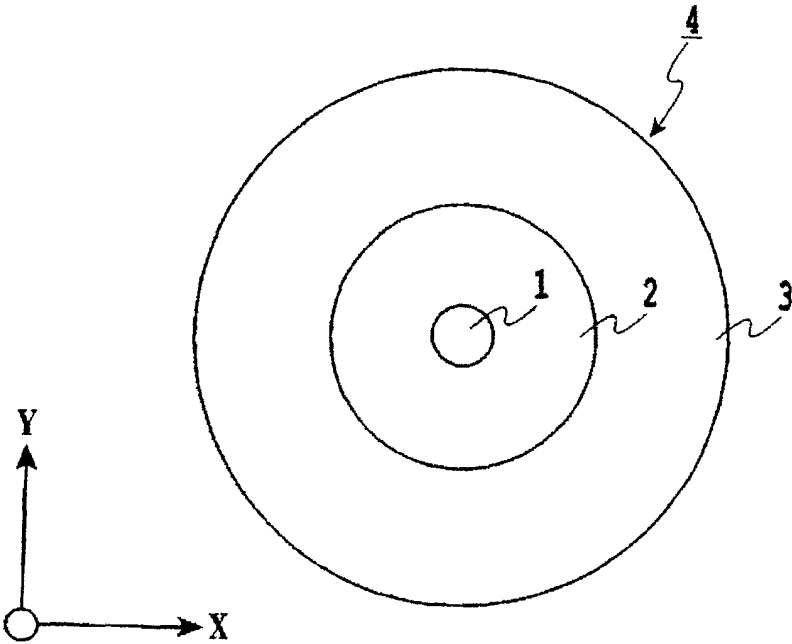


图1

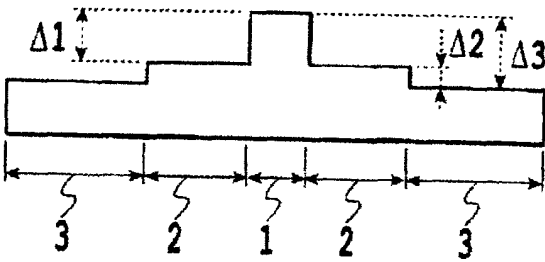


图2

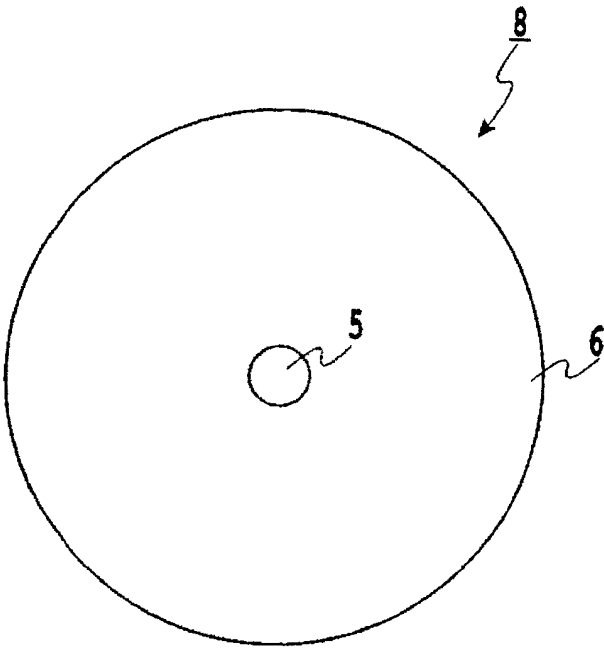


图3

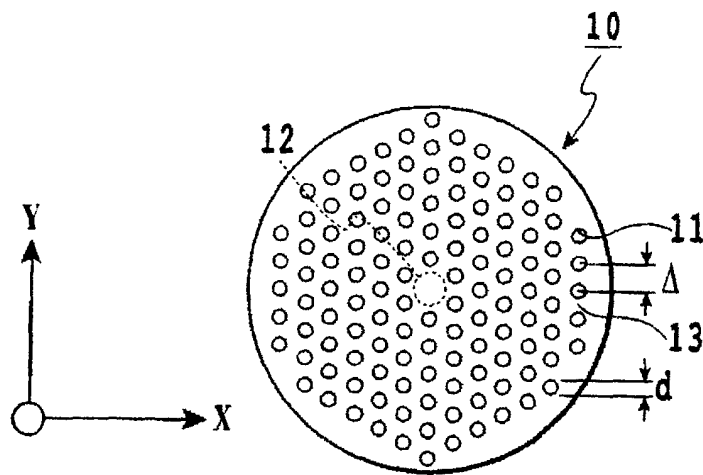


图4

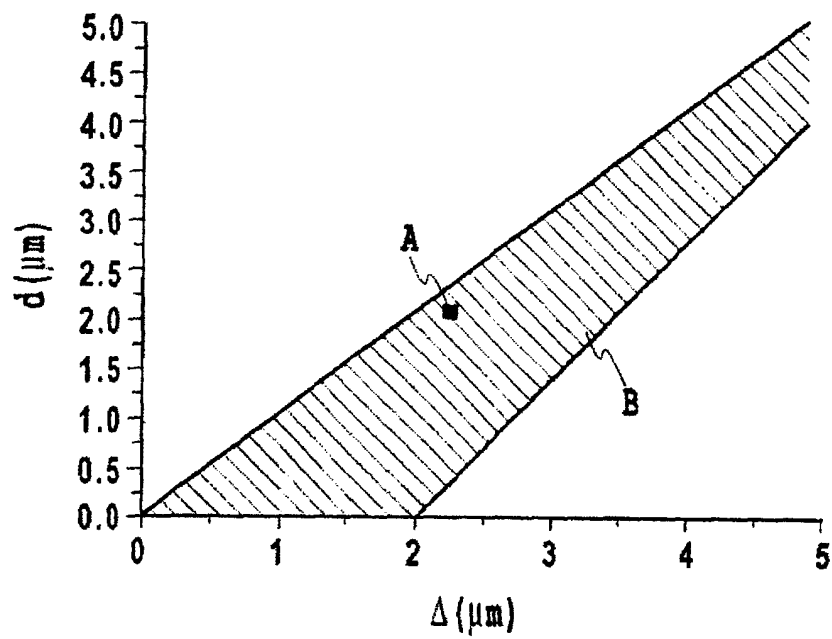


图5

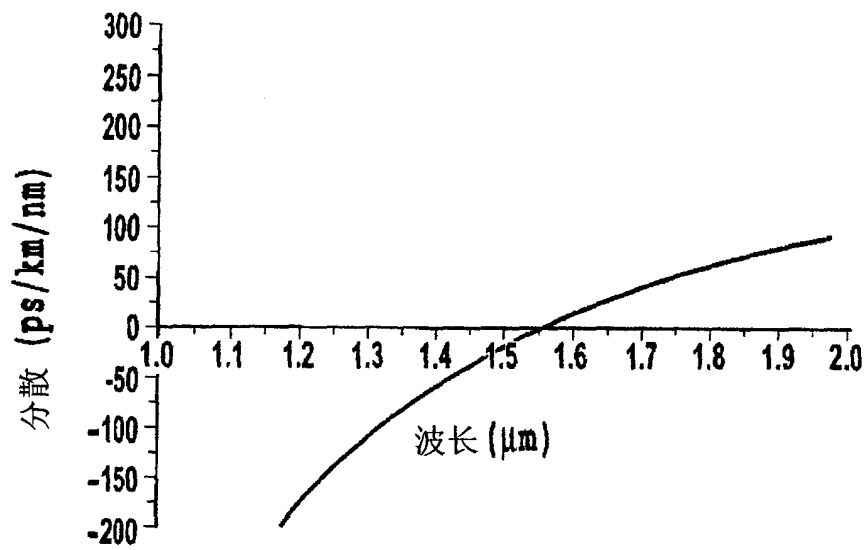


图6

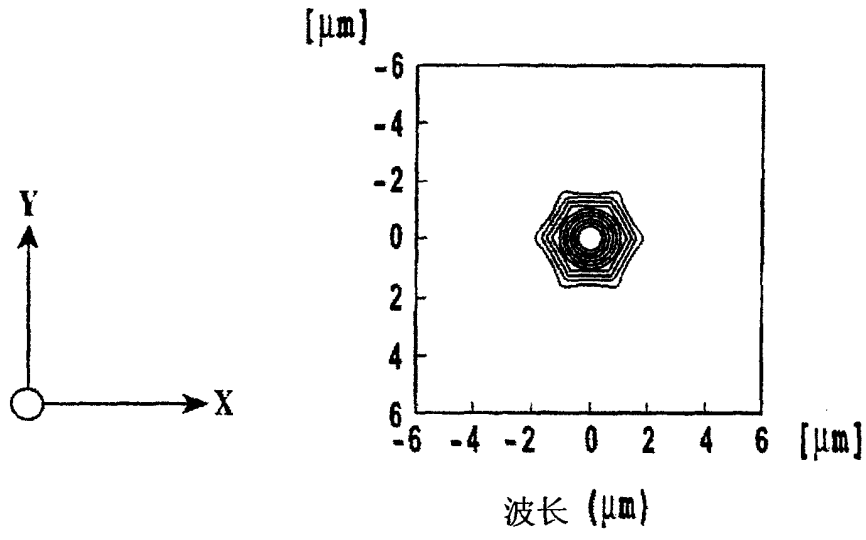


图7

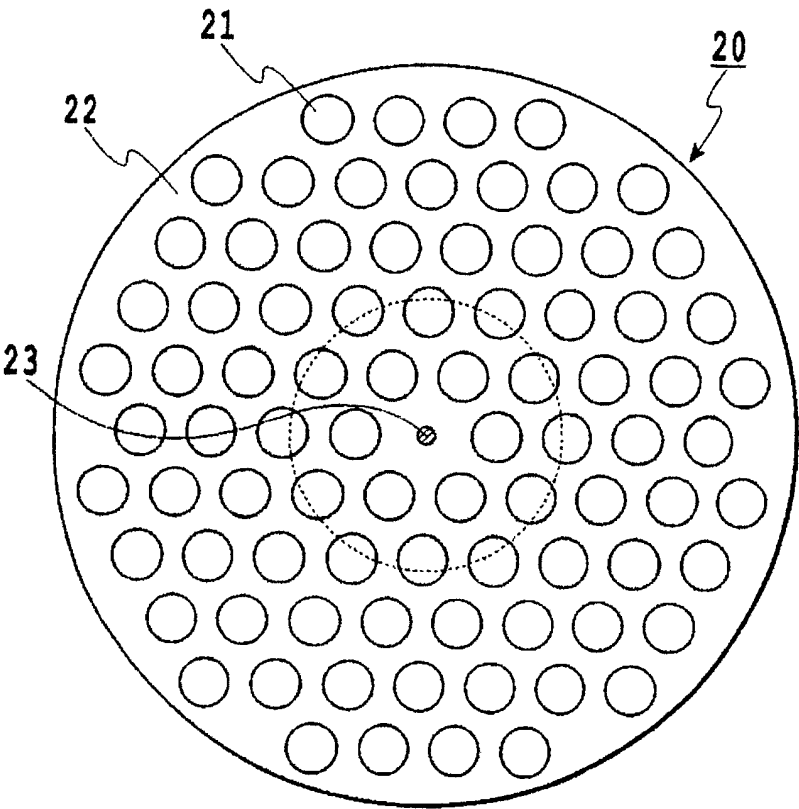


图8A

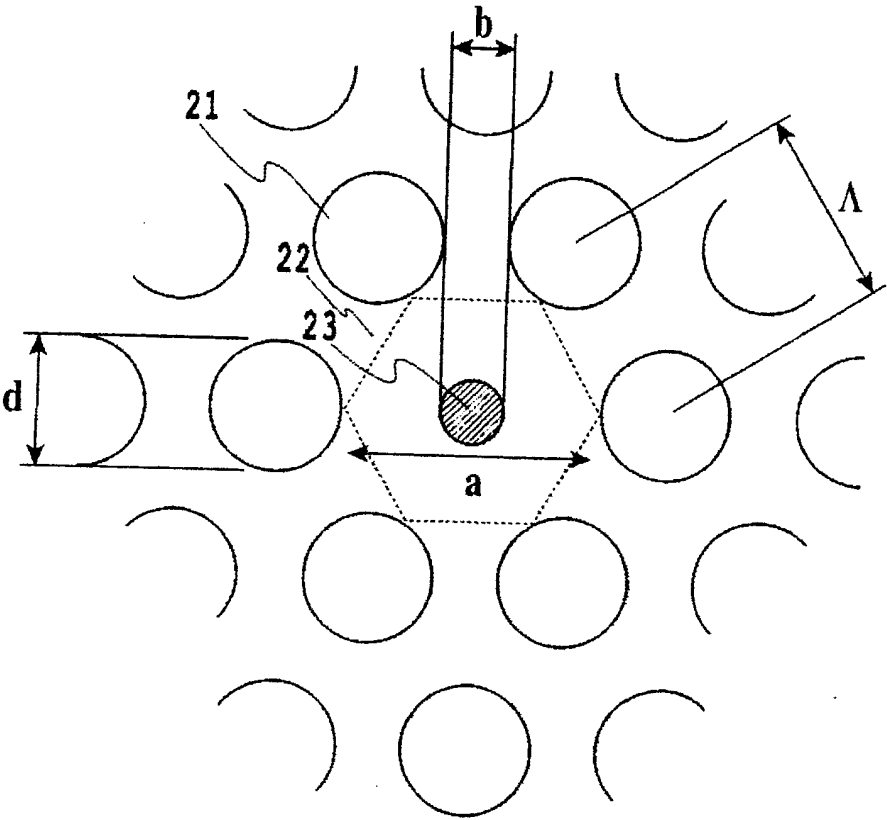


图8B

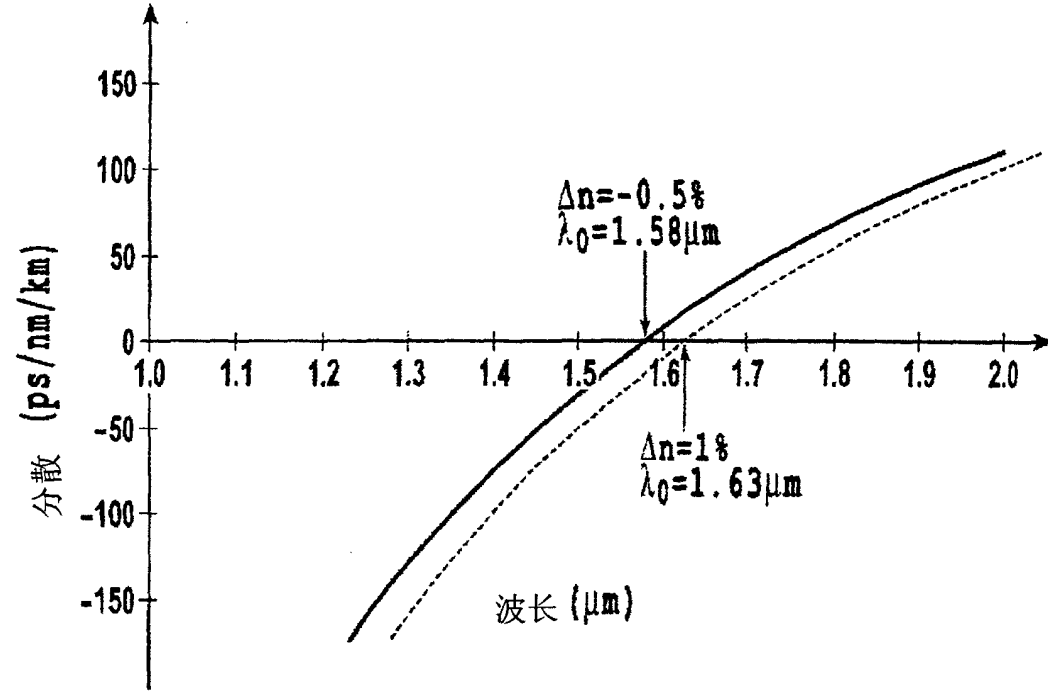


图9

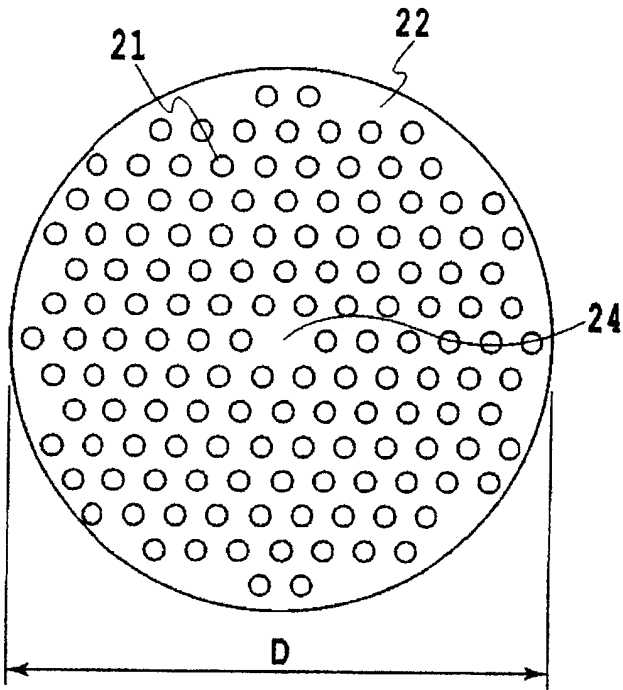


图10A

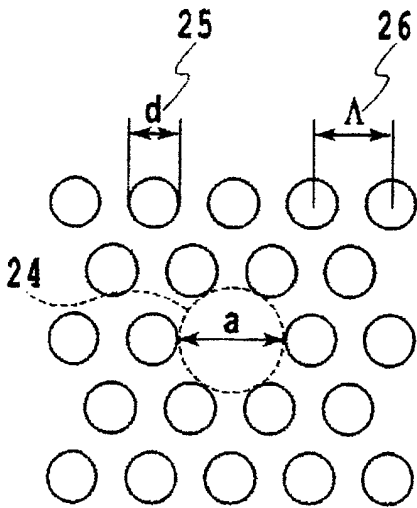


图10B

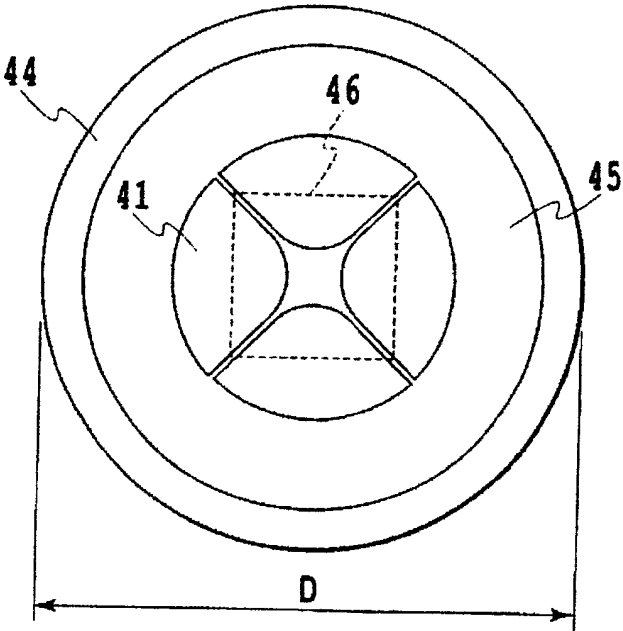


图11A

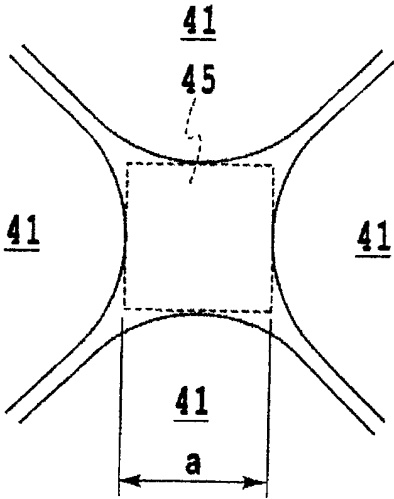


图11B

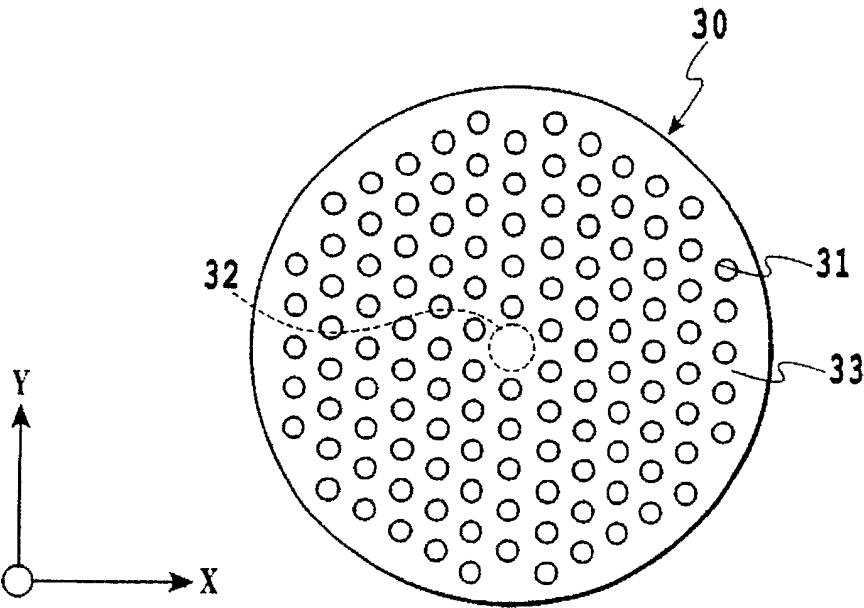


图12

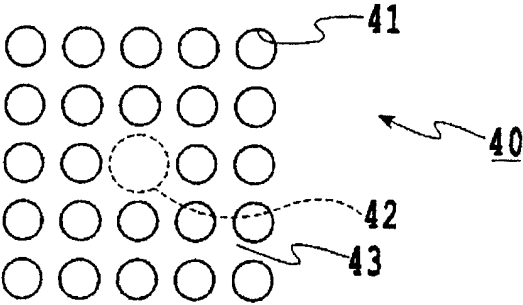


图13

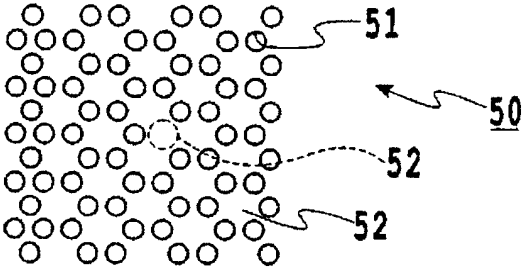


图14

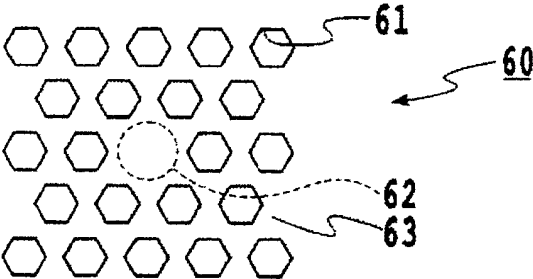
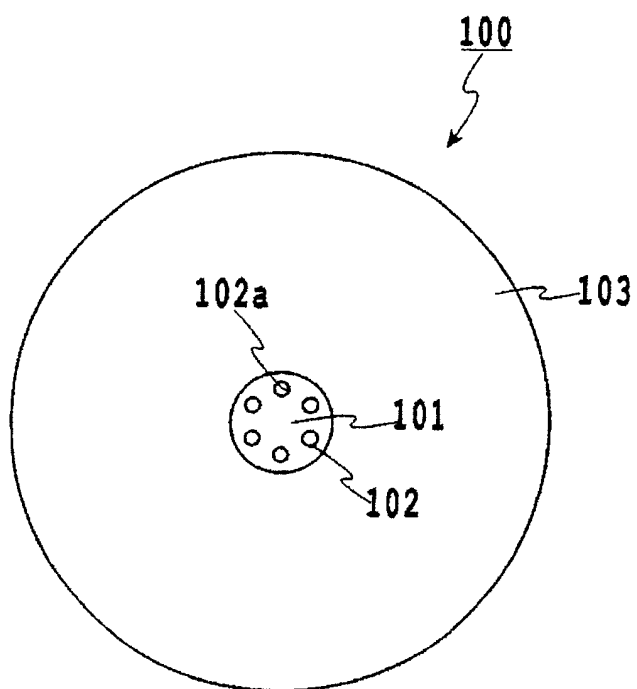


图15

**图16**

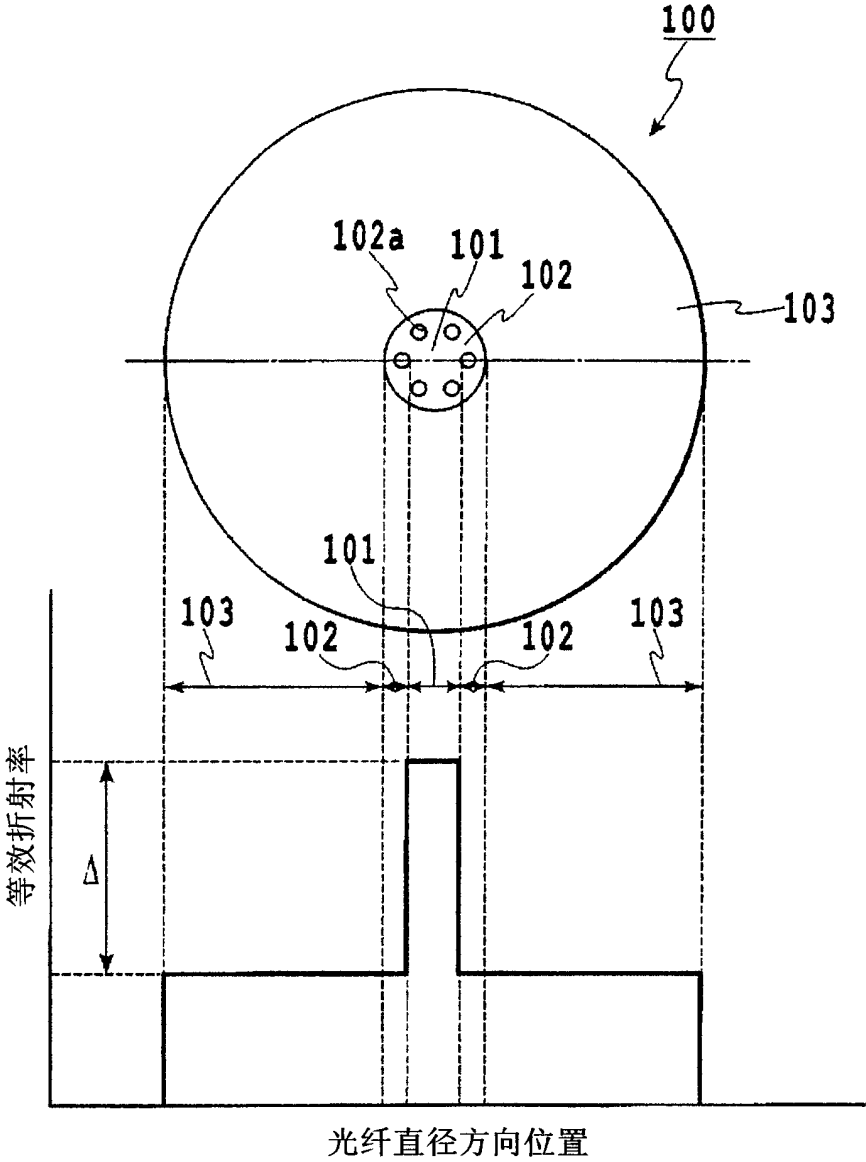


图17

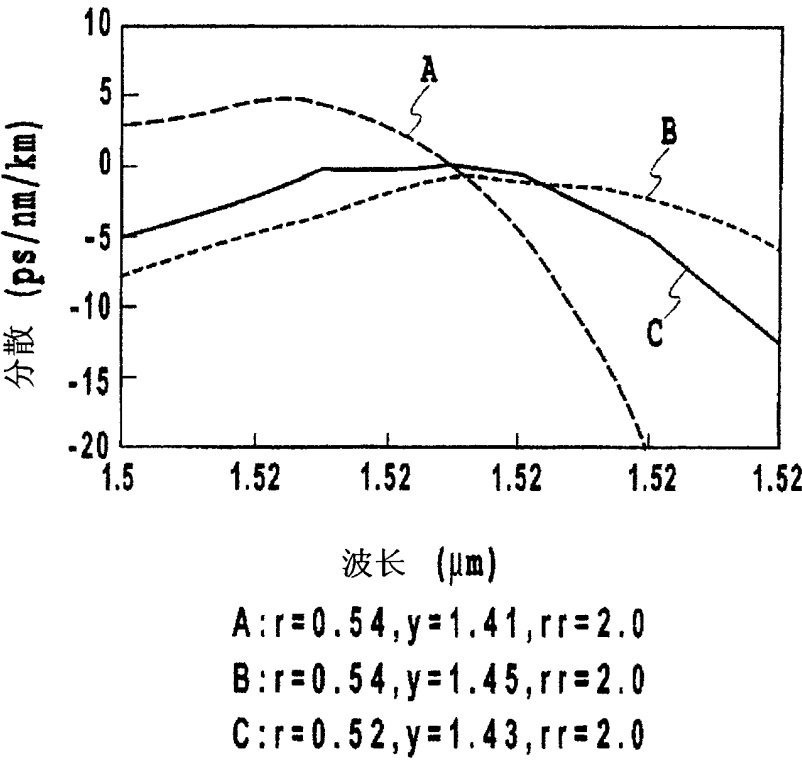


图18

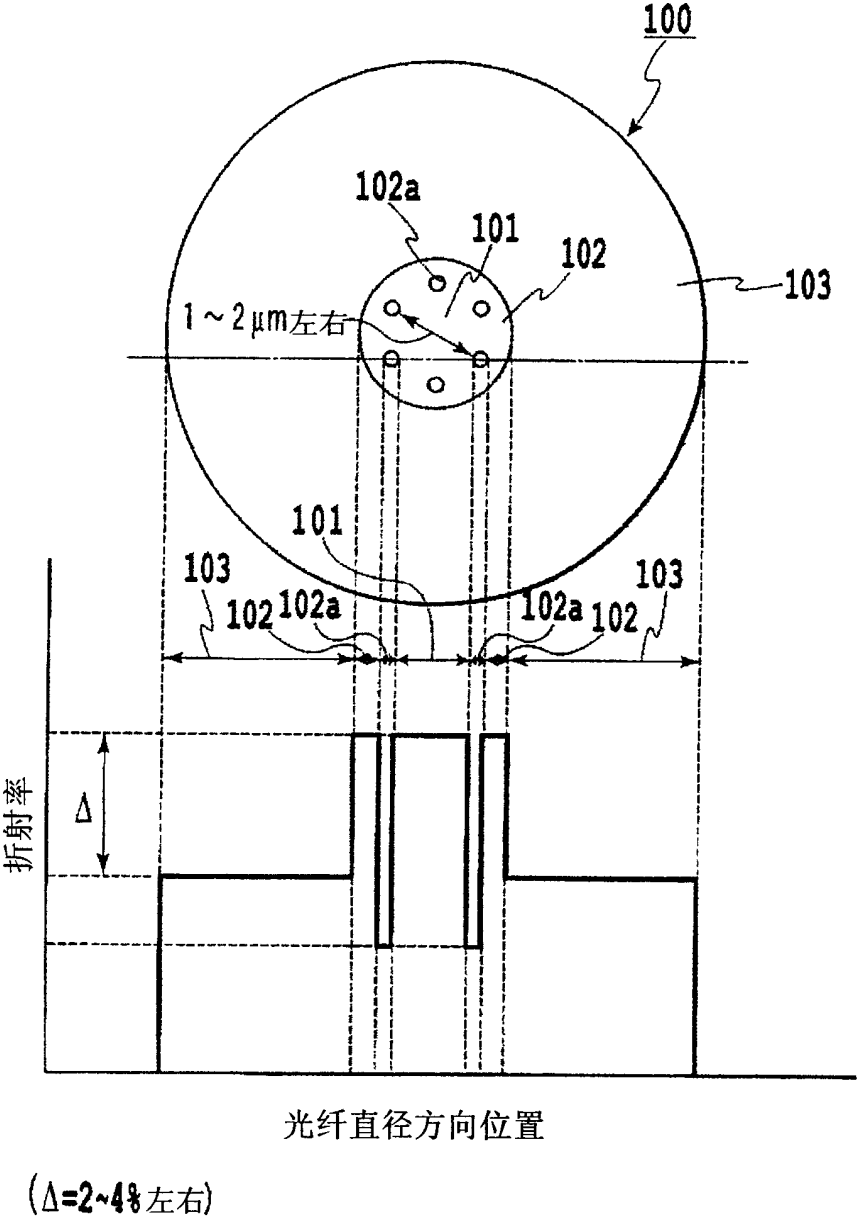


图19

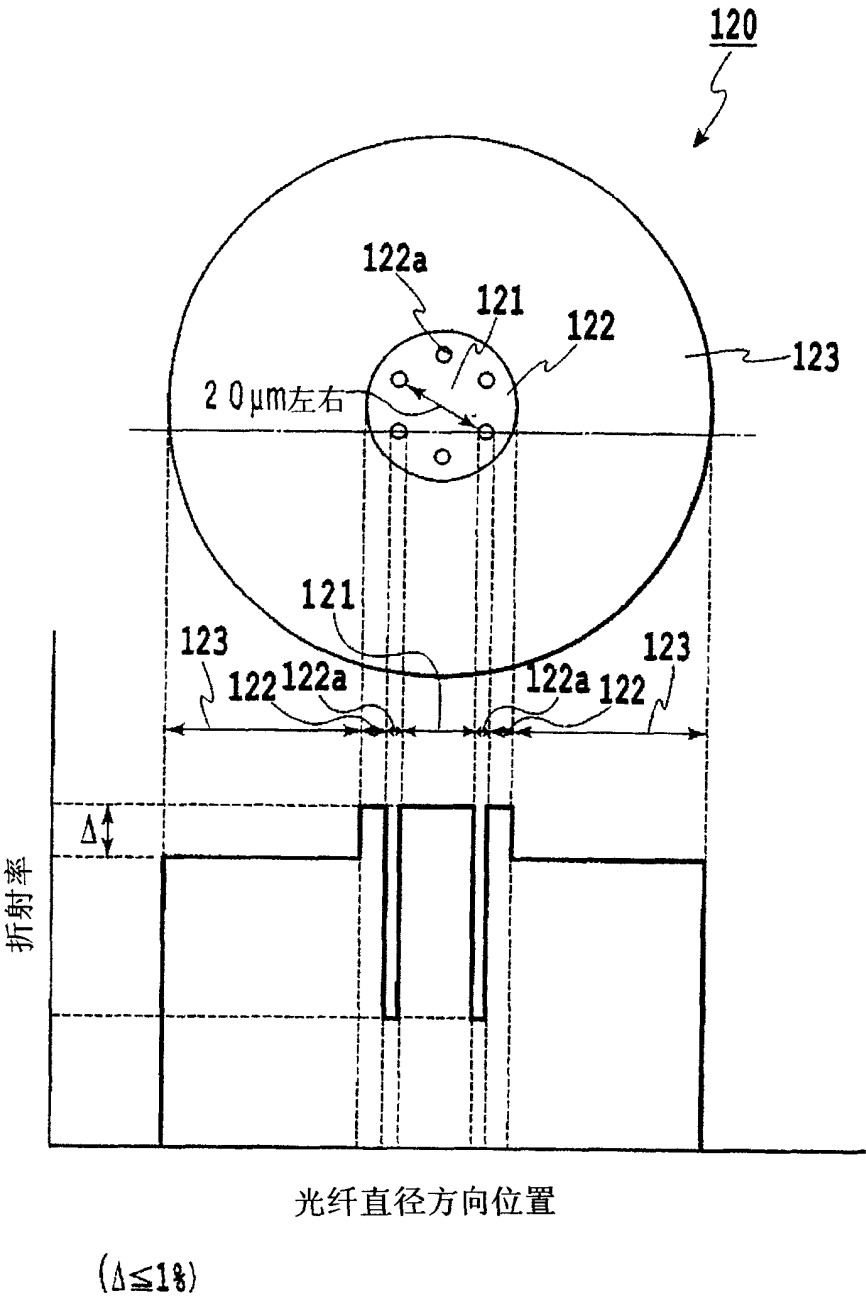


图20

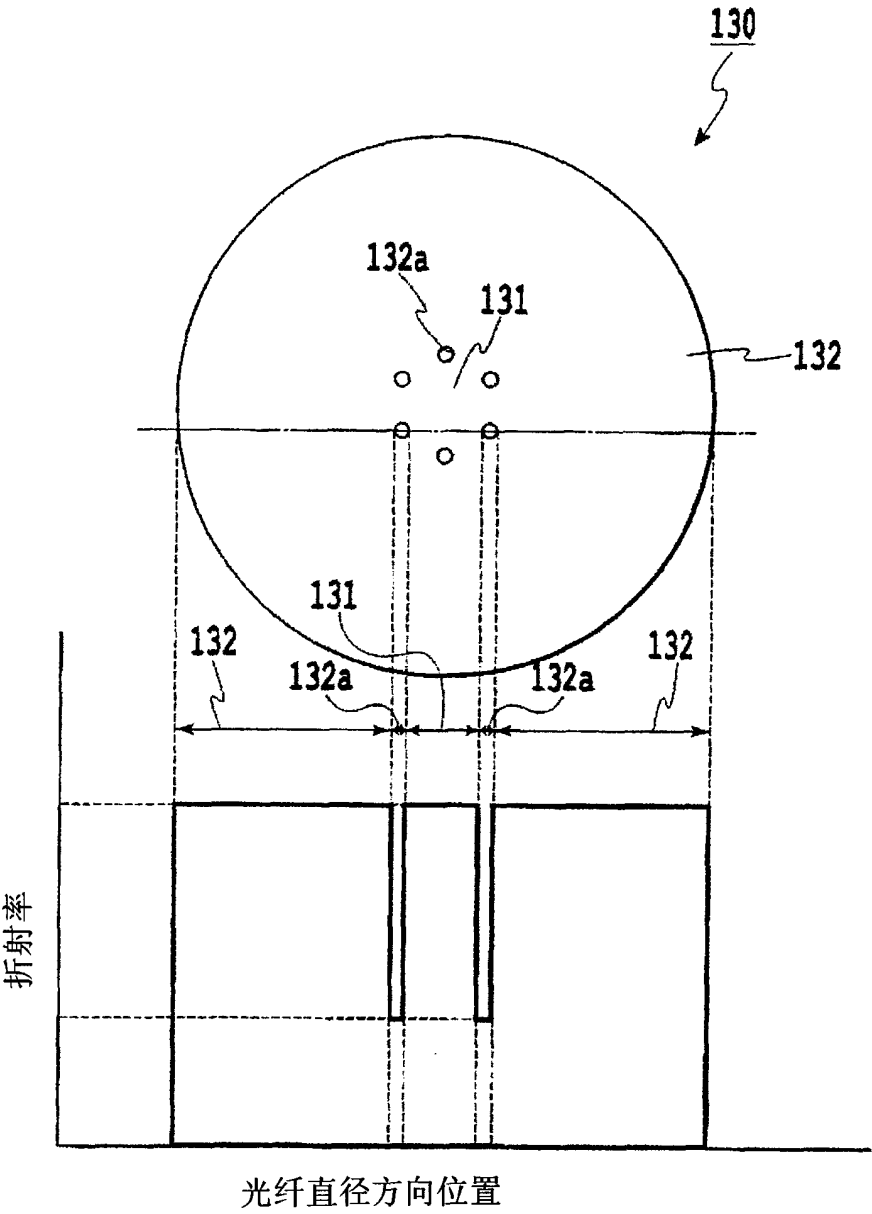
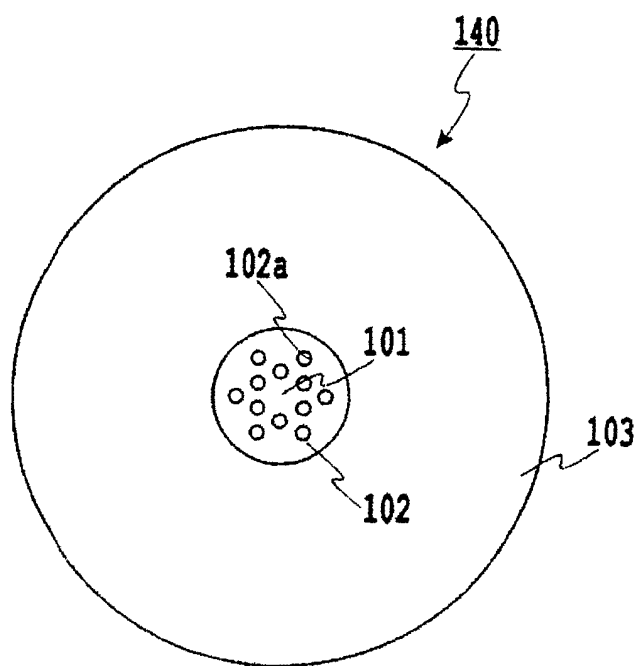


图21

**图22**

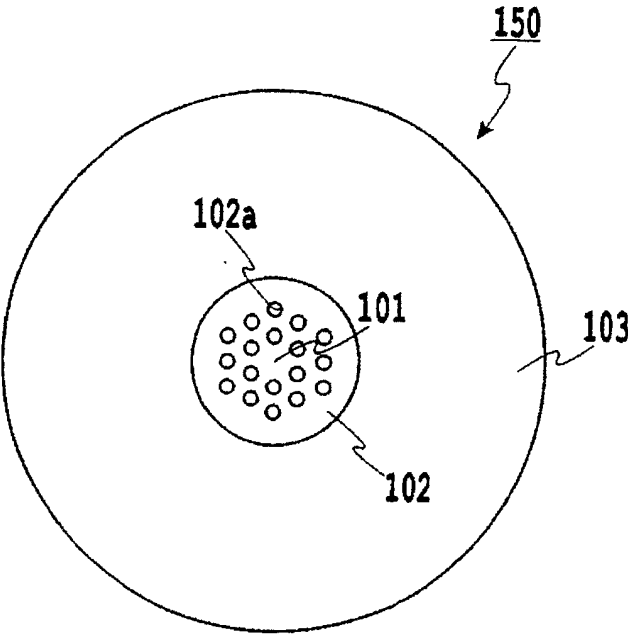


图23

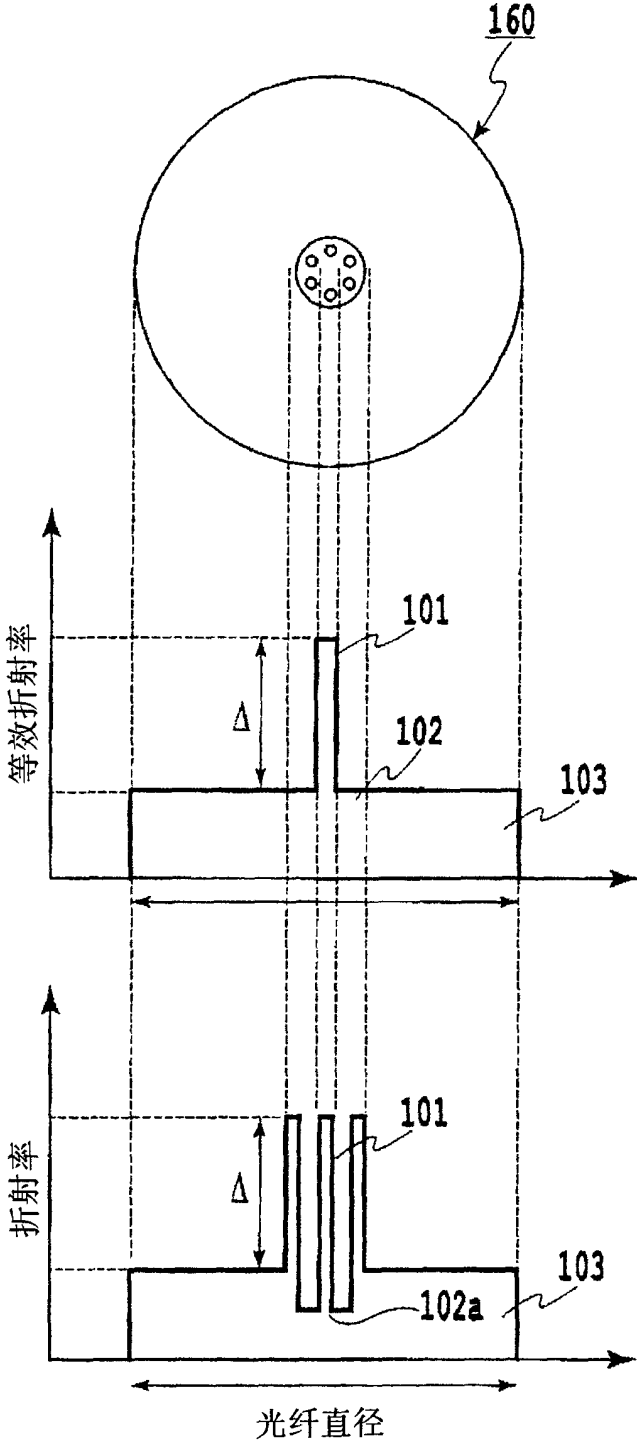


图24

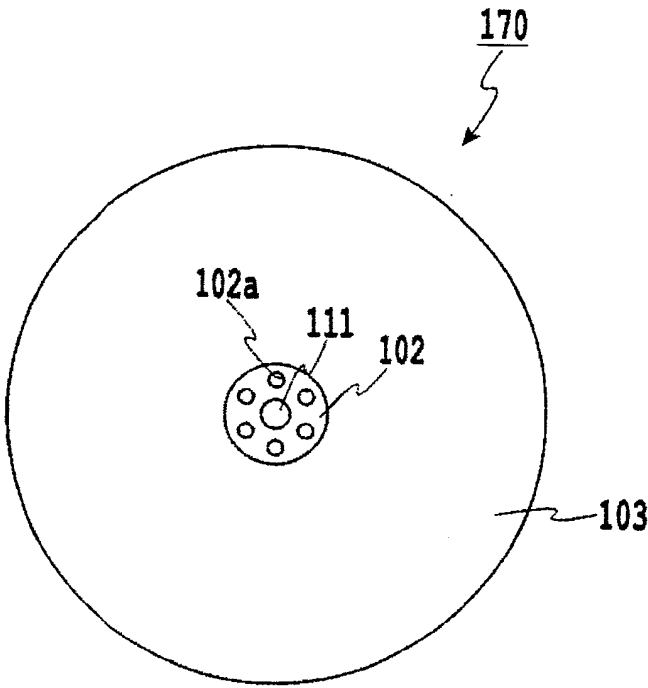


图25

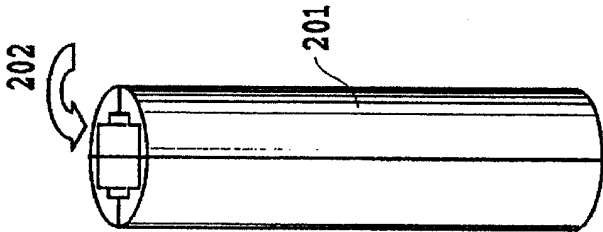


图26A

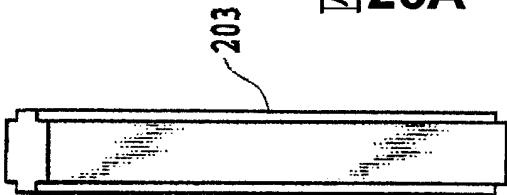


图26B

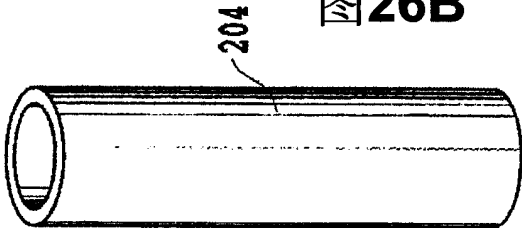


图26C

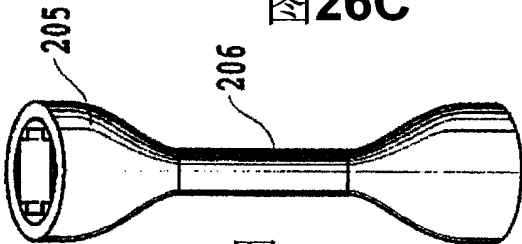


图26D

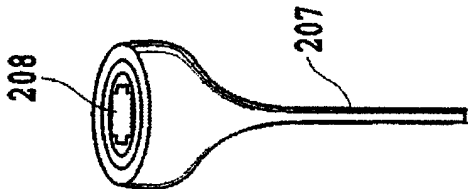


图26E

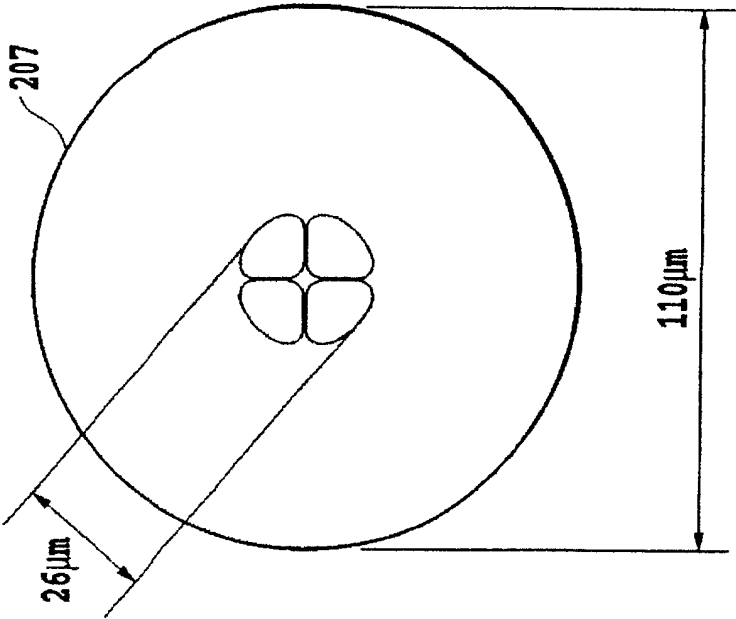


图27A

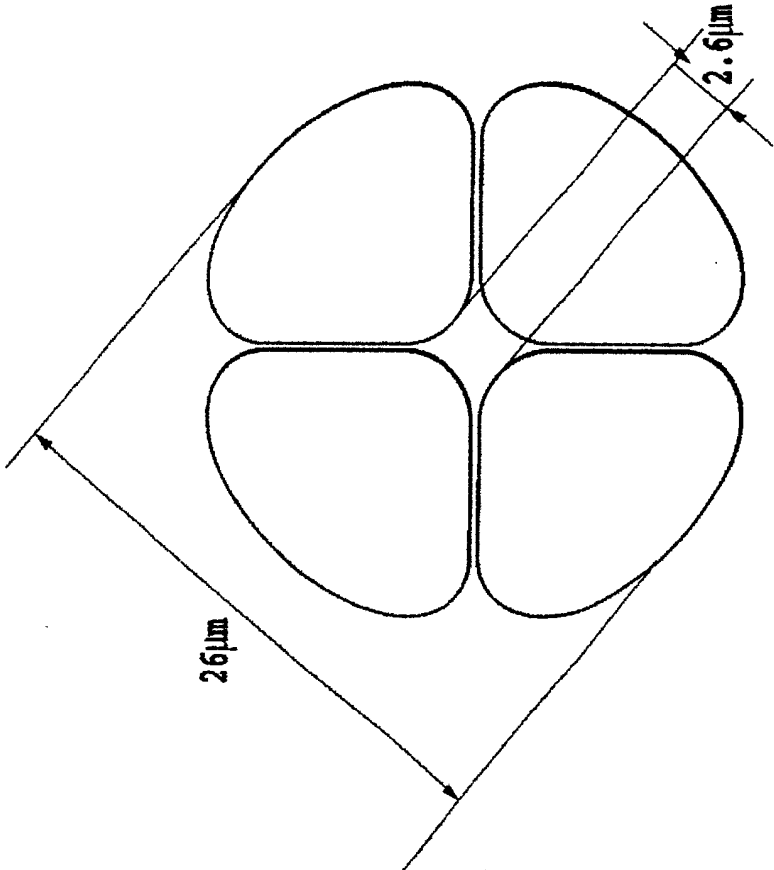


图27B

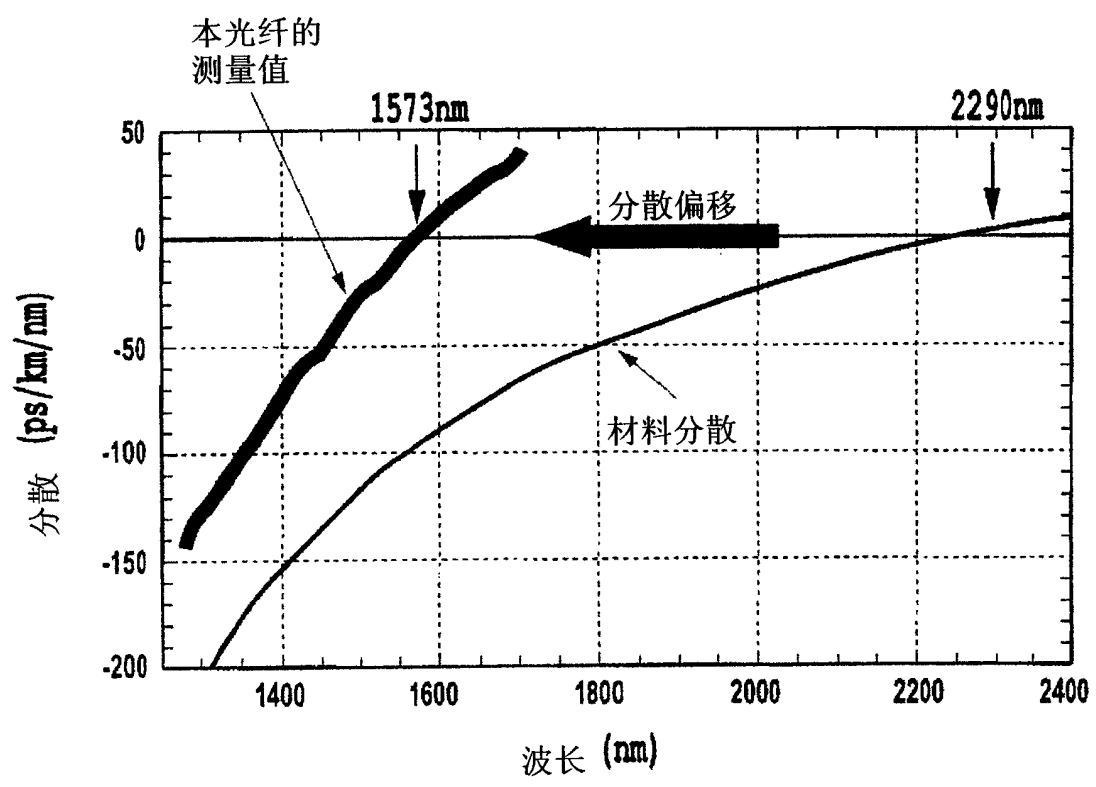


图28

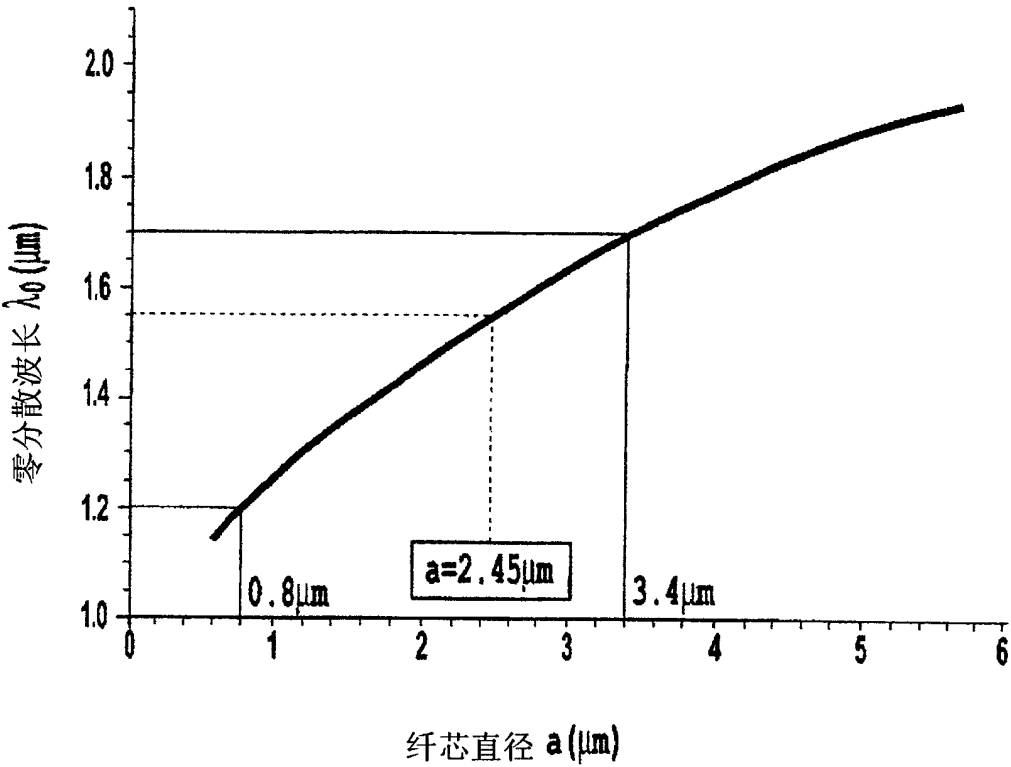


图29

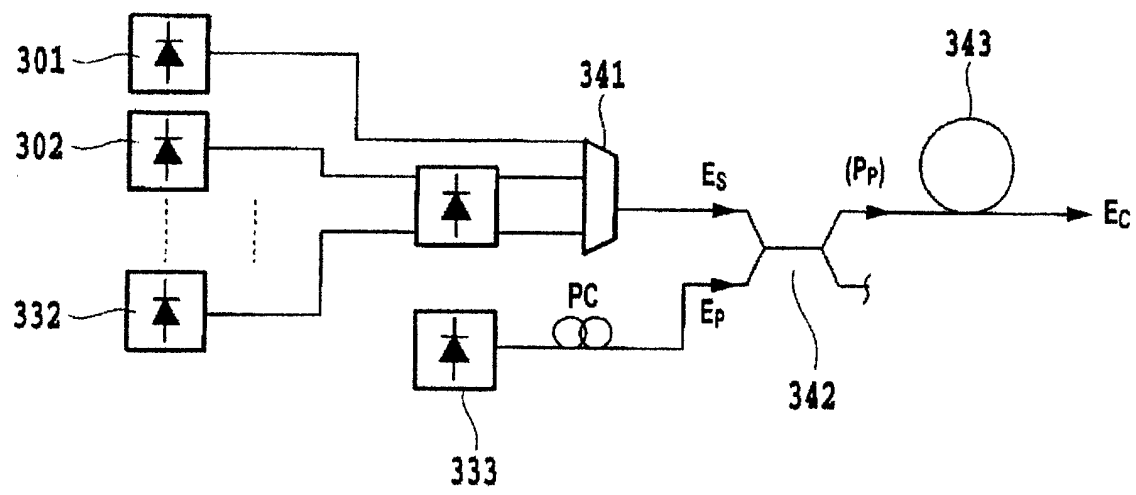


图30

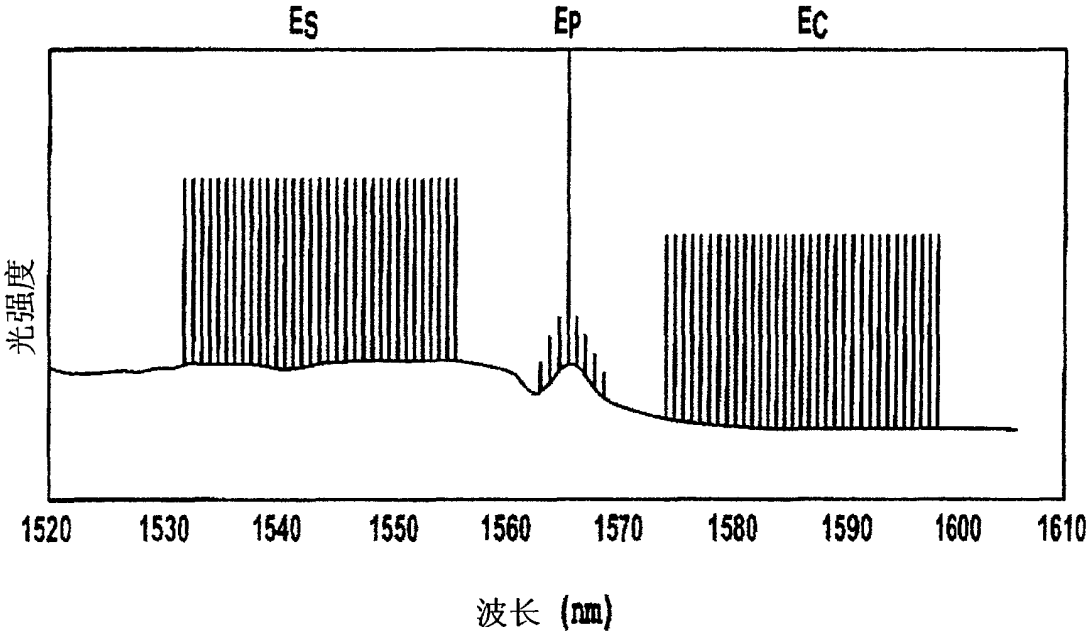


图31

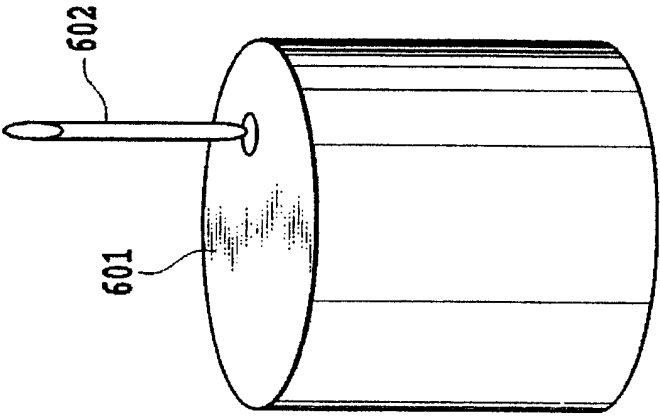


图32A

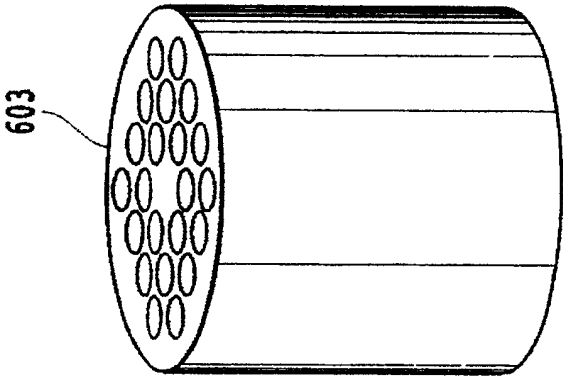


图32B

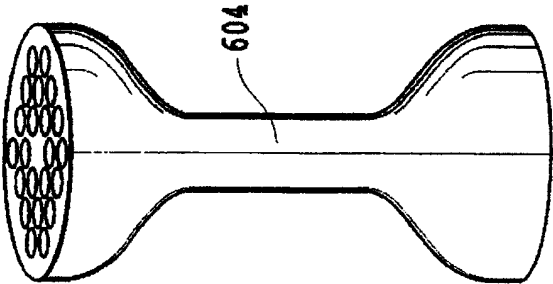


图32C

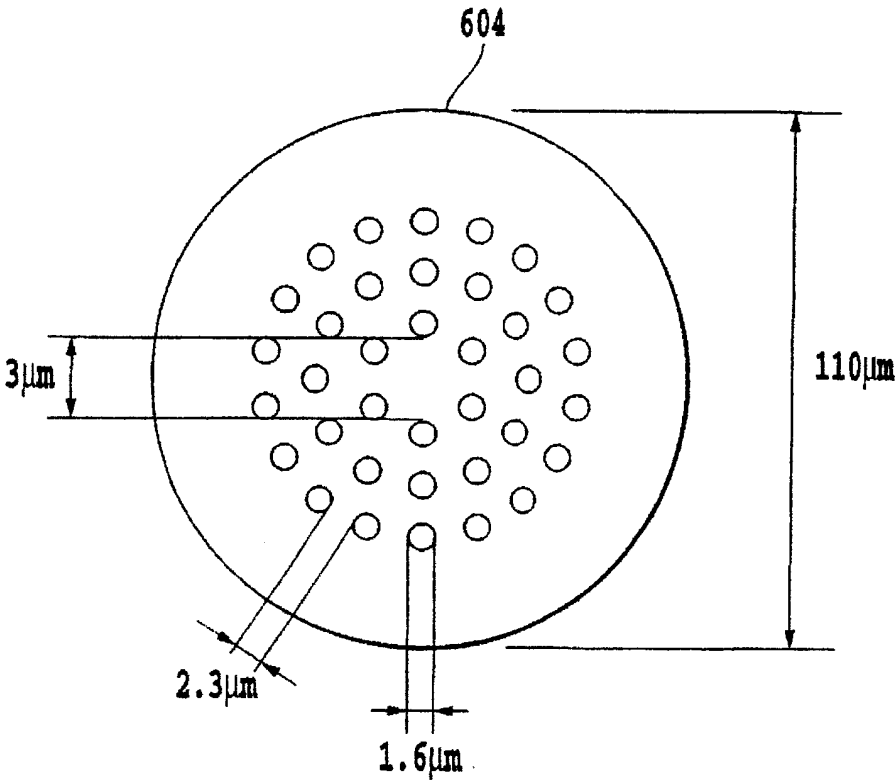


图33

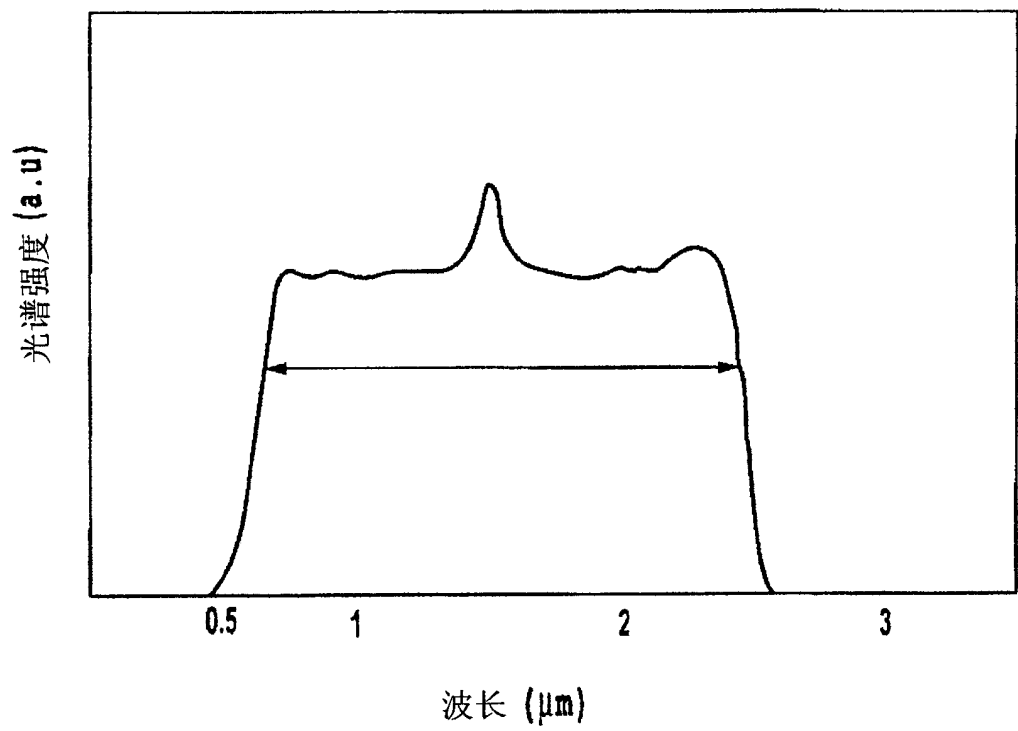


图34

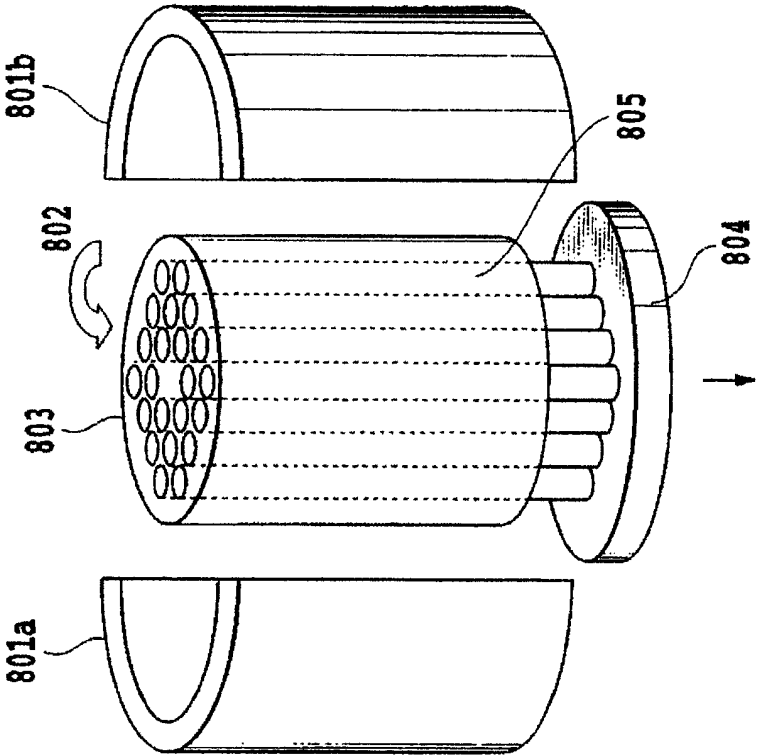


图35A

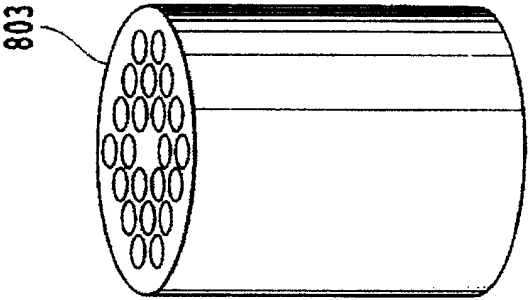


图35B

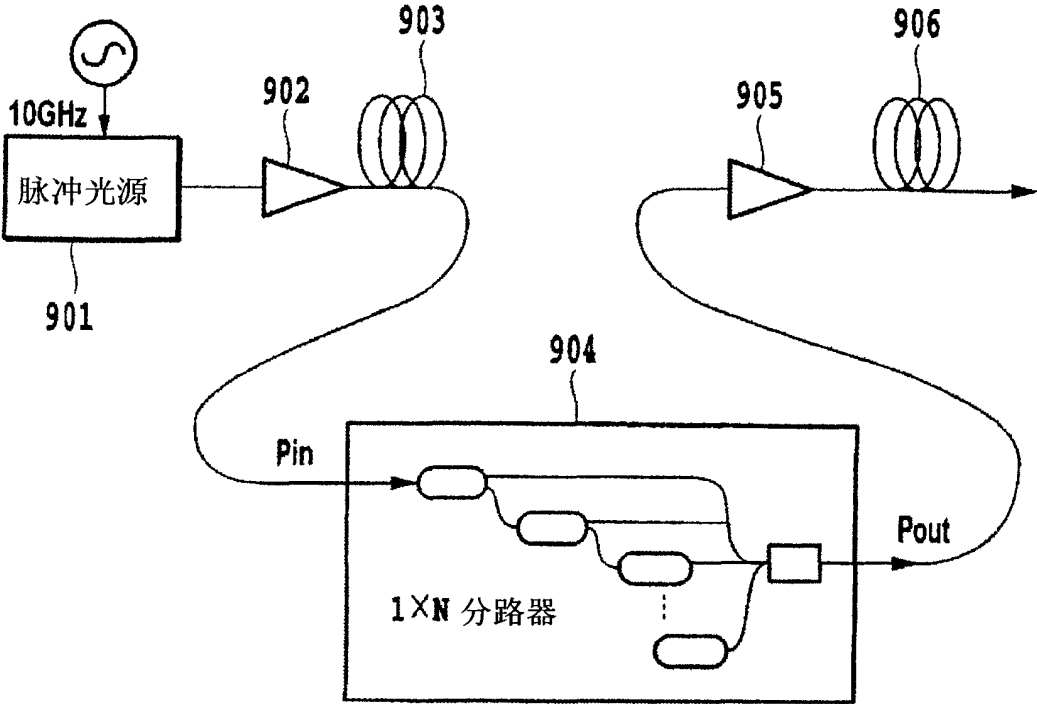


图36

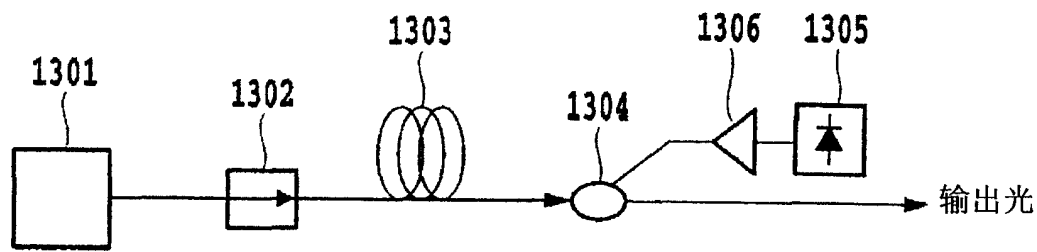


图37

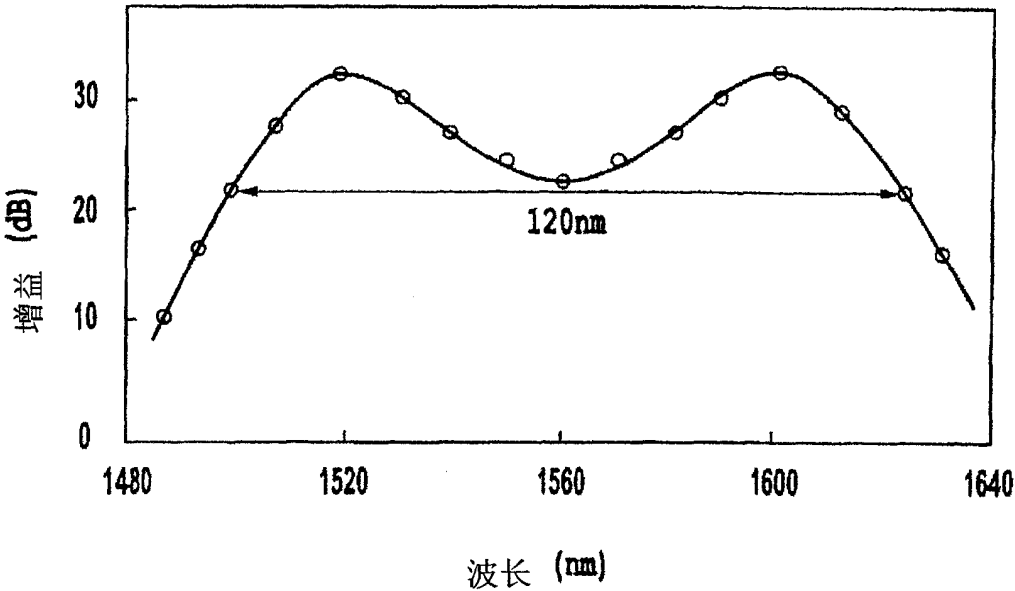


图38

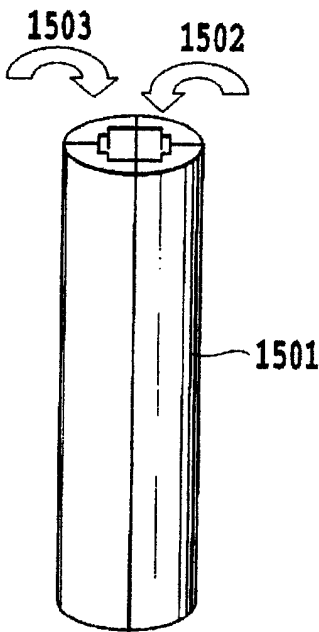


图39A

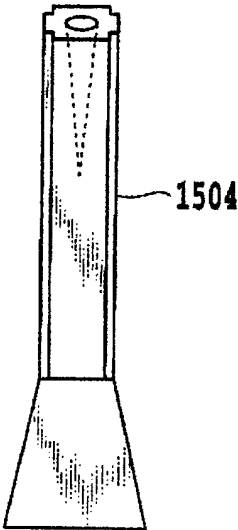


图39B

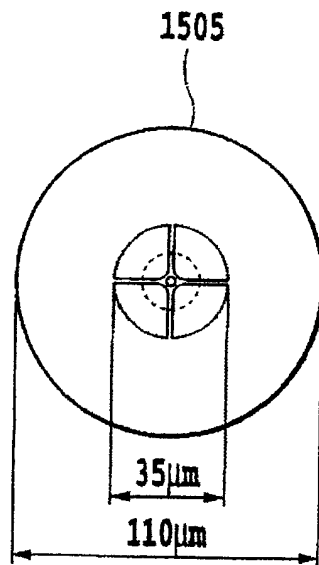


图40A

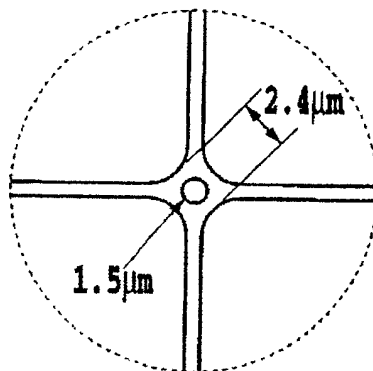


图40B

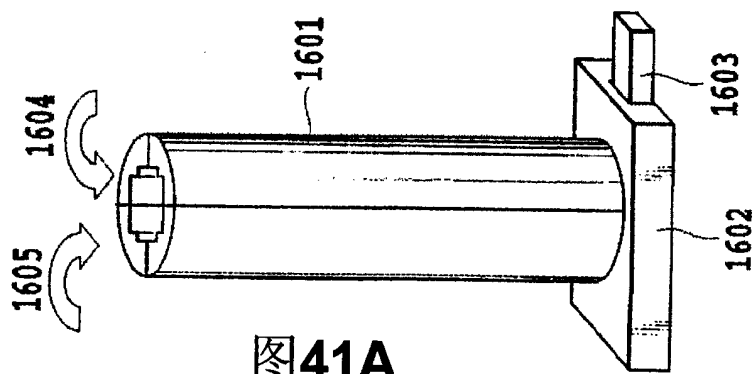


图41A

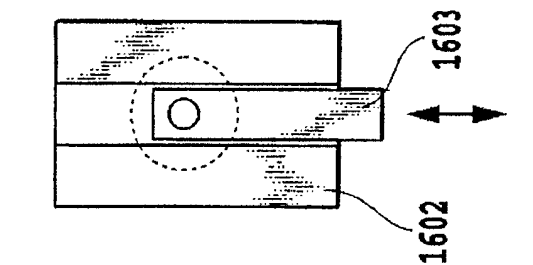


图41B

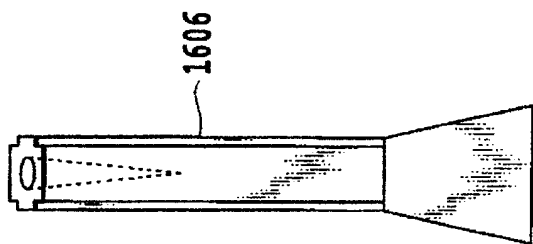


图41C

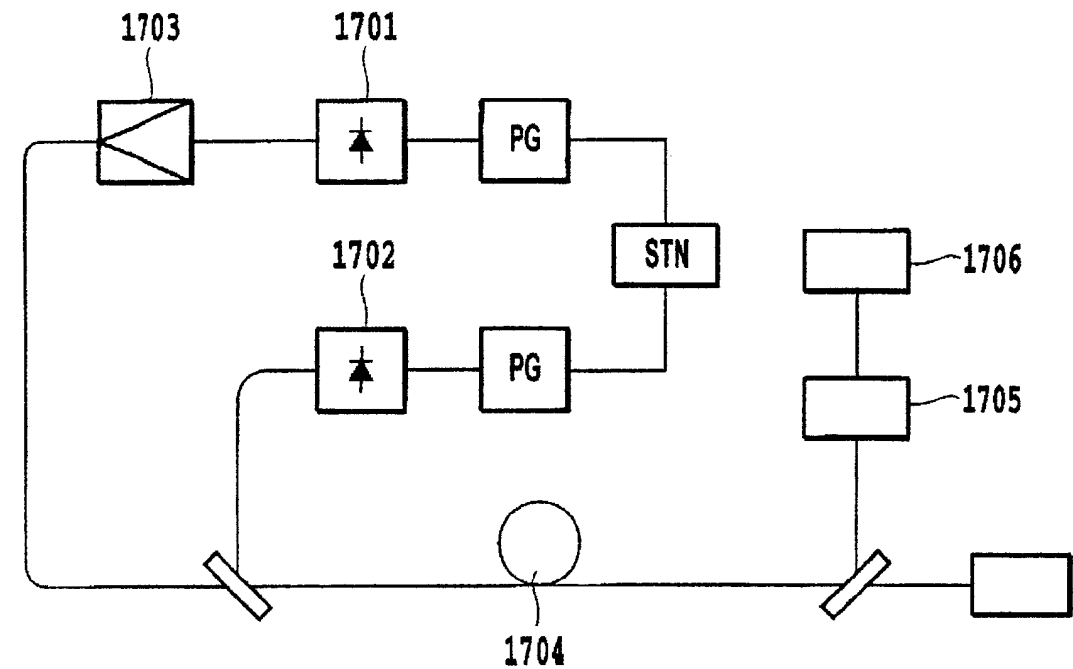
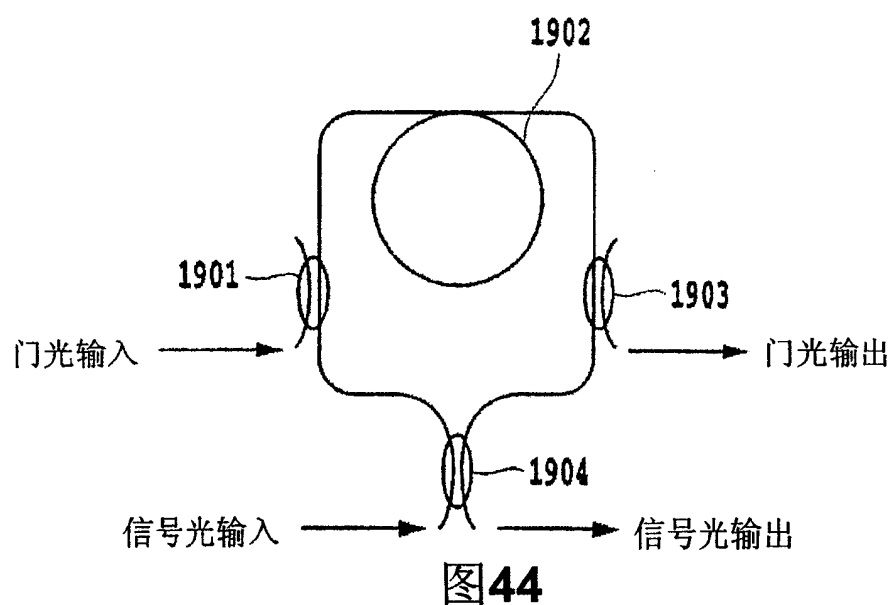
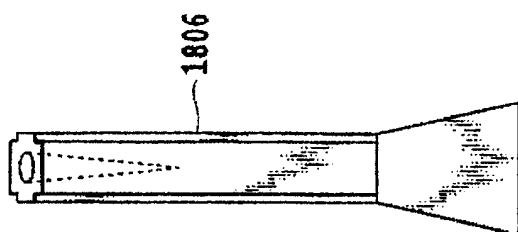
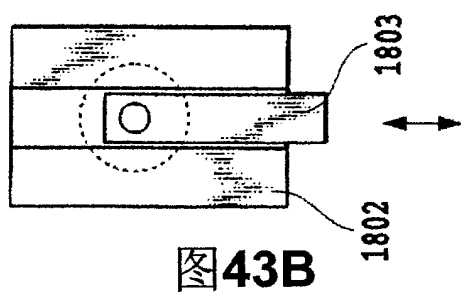
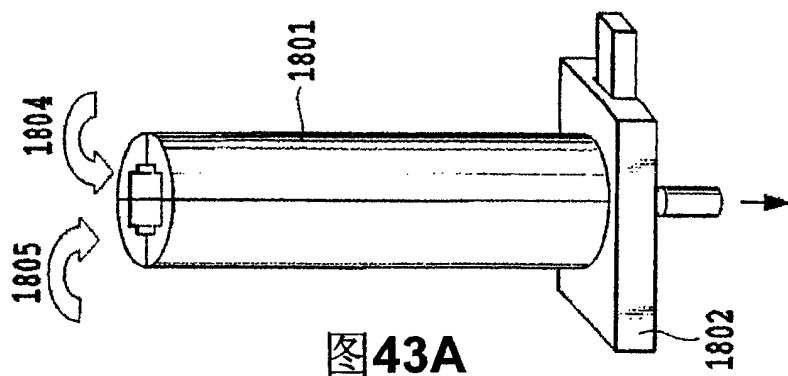


图42



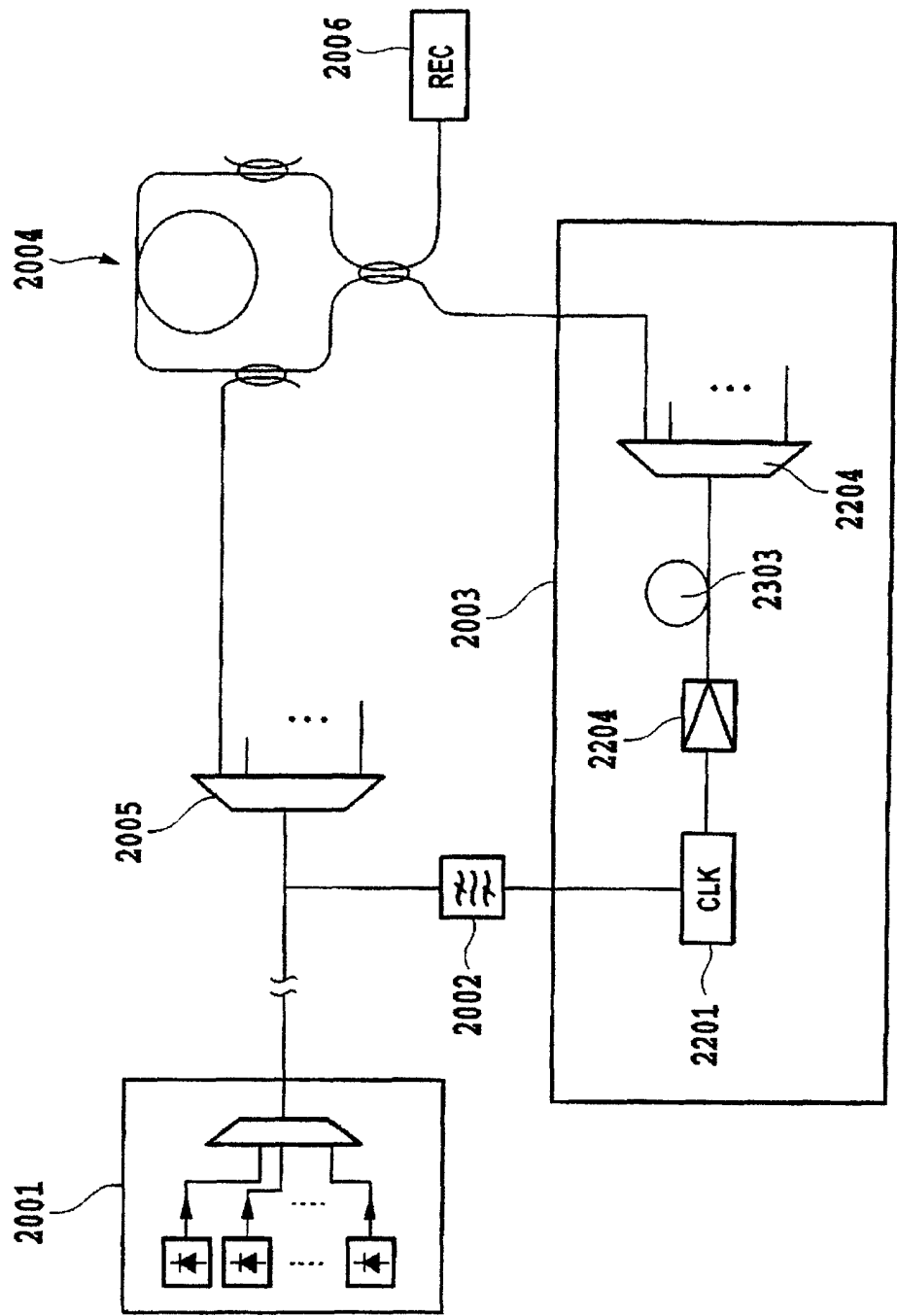


图 45

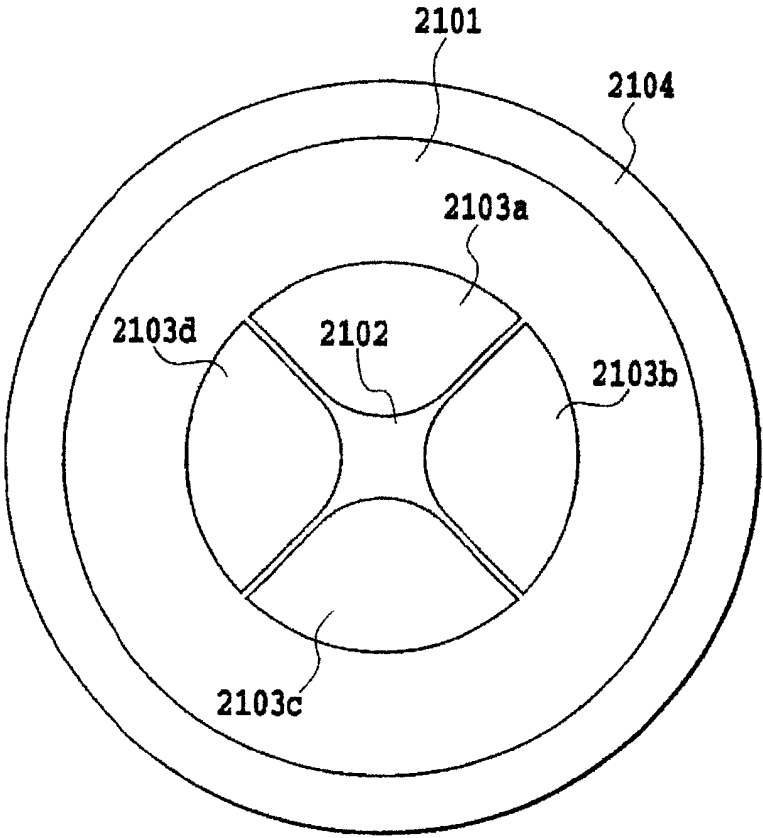


图46

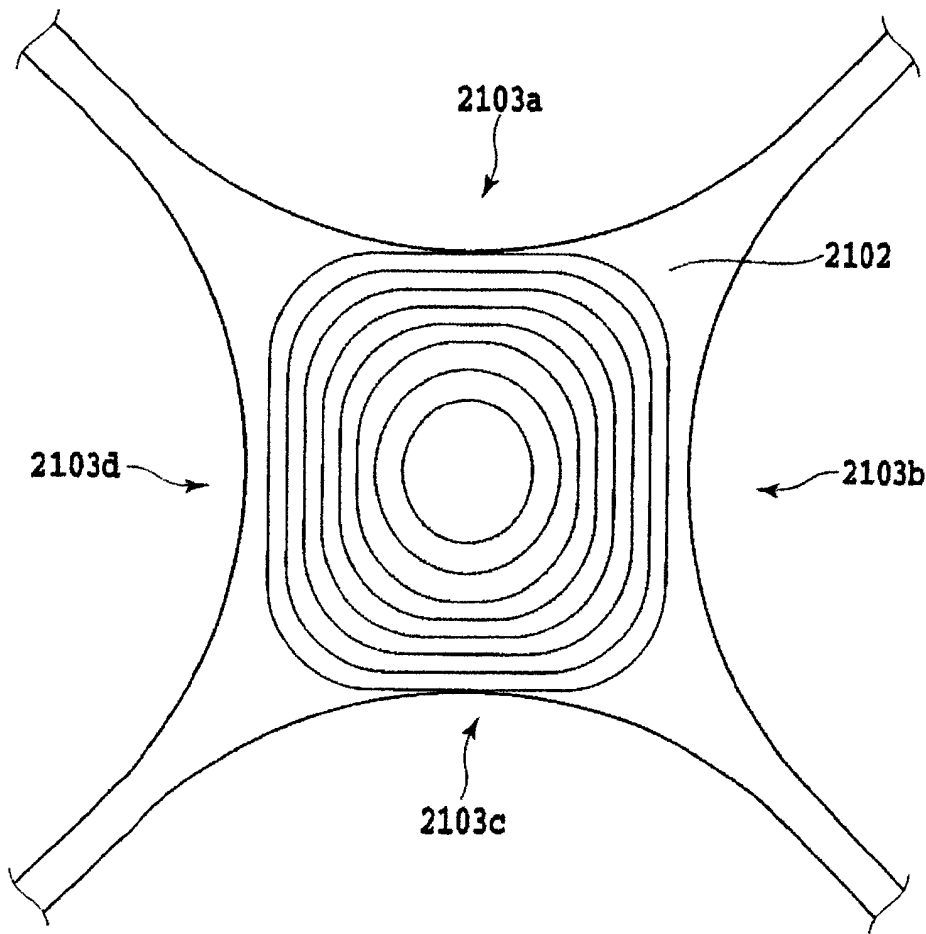


图47

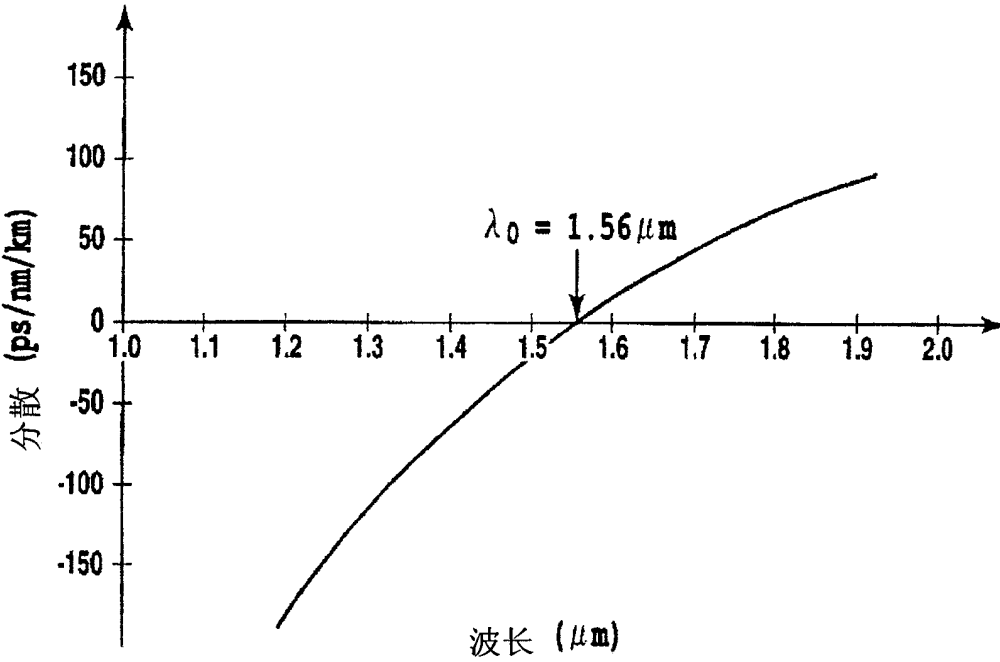


图48

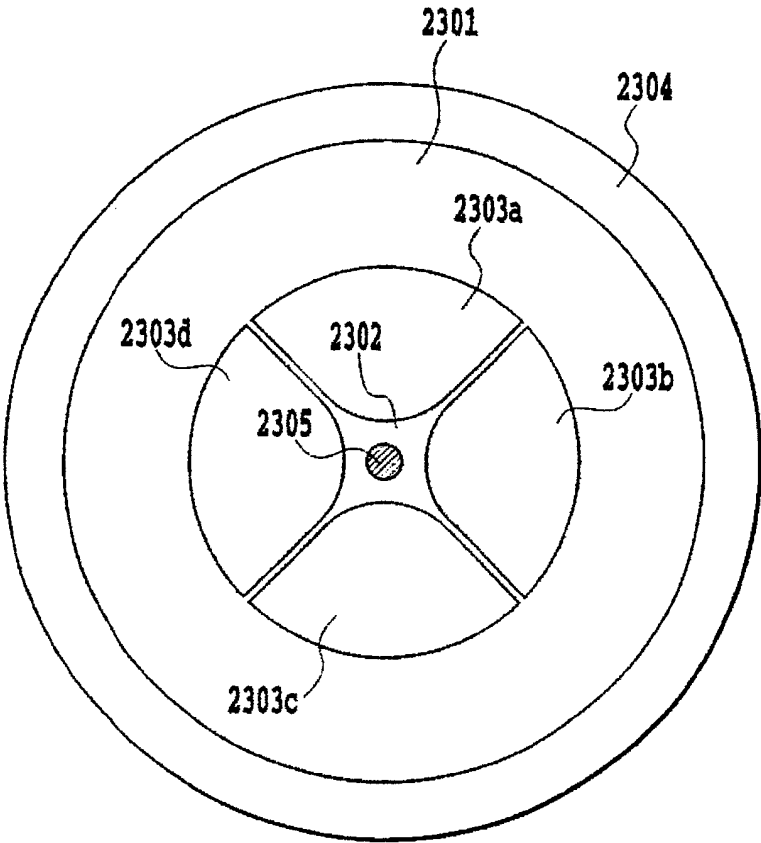


图49

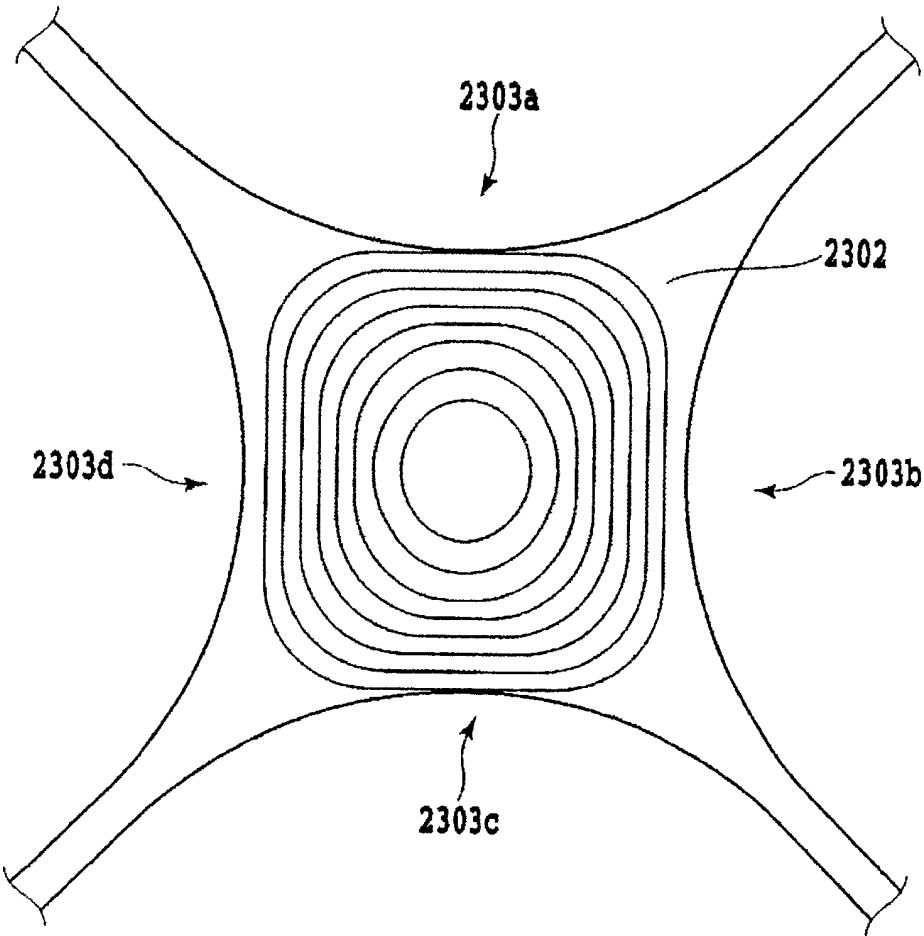


图50

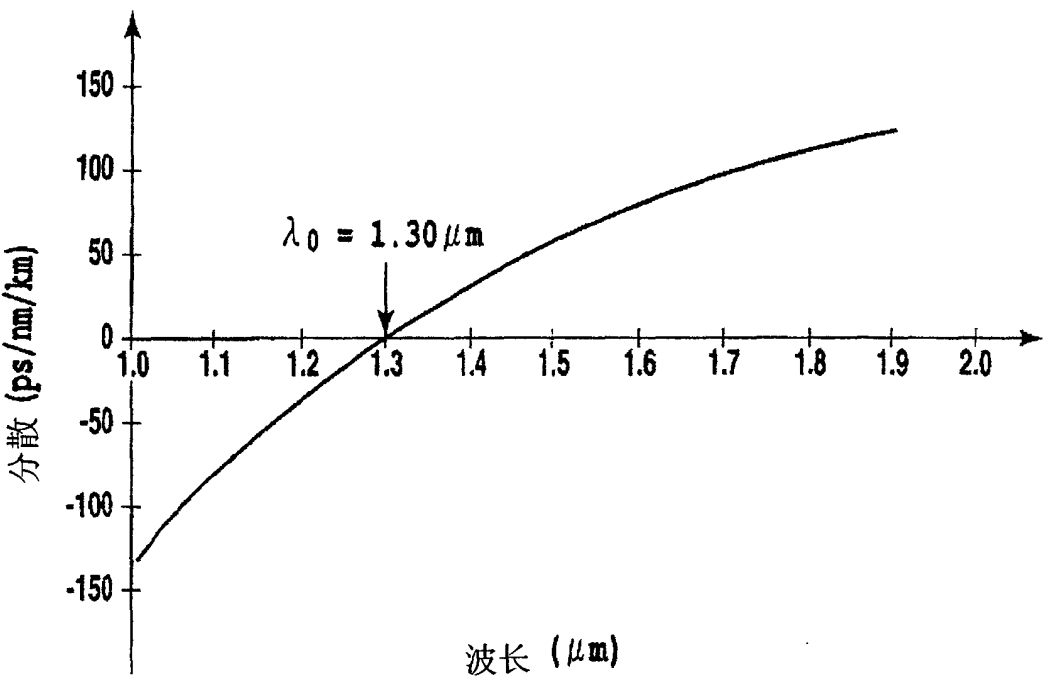


图51

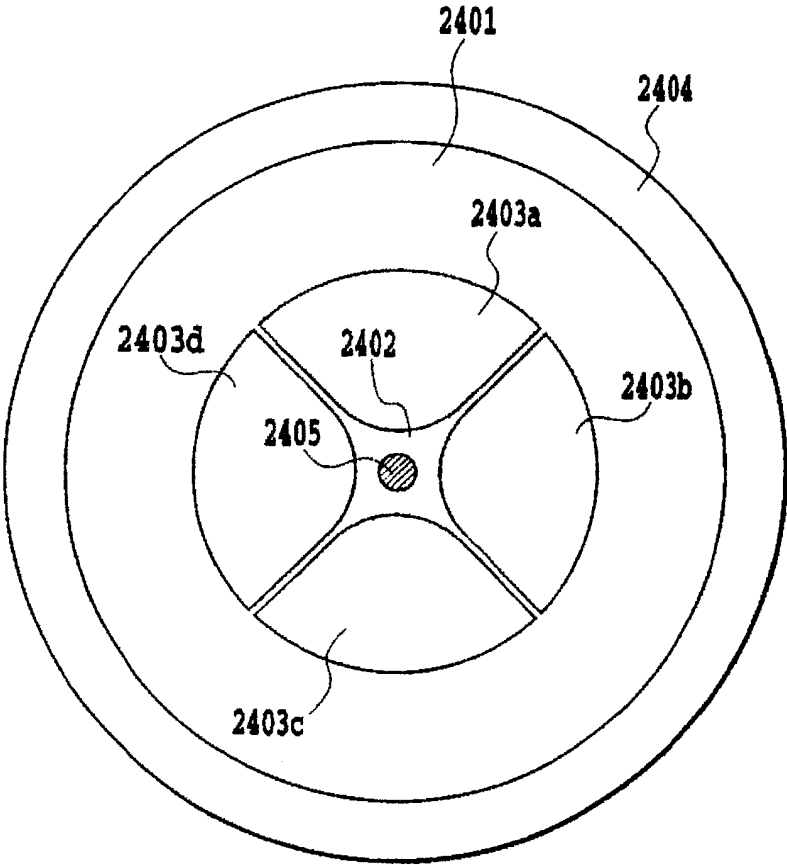


图52

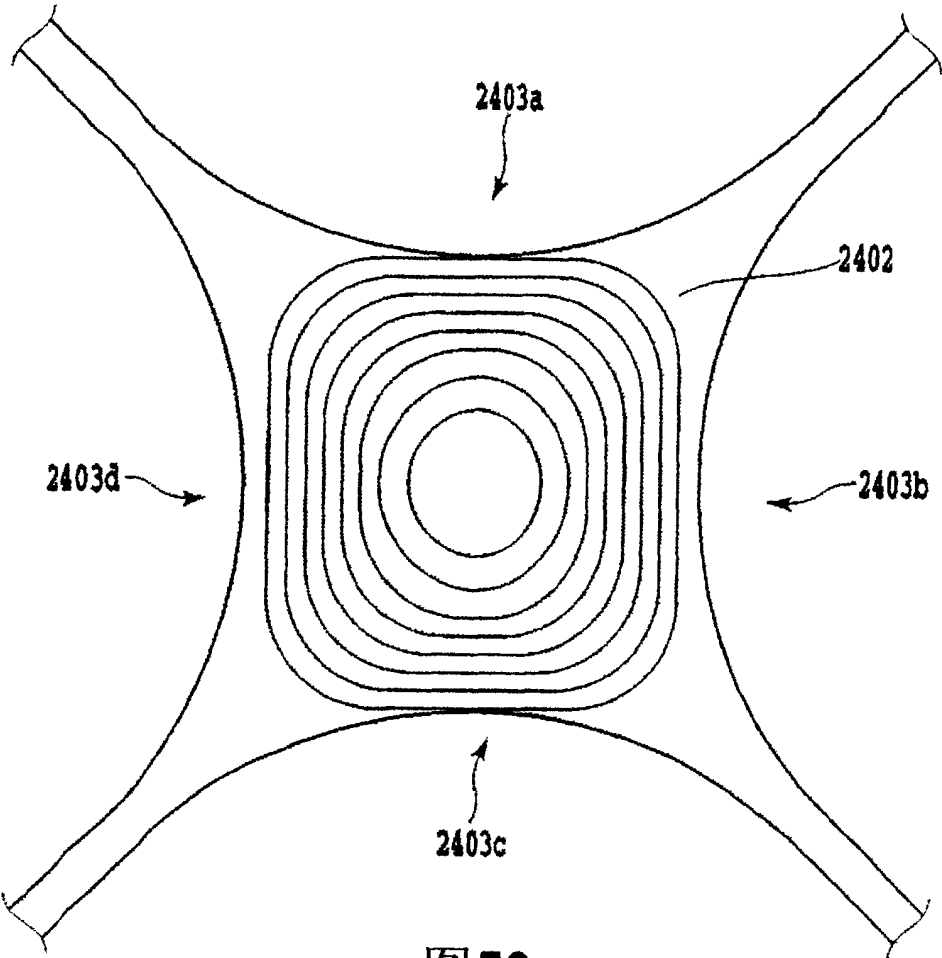


图53

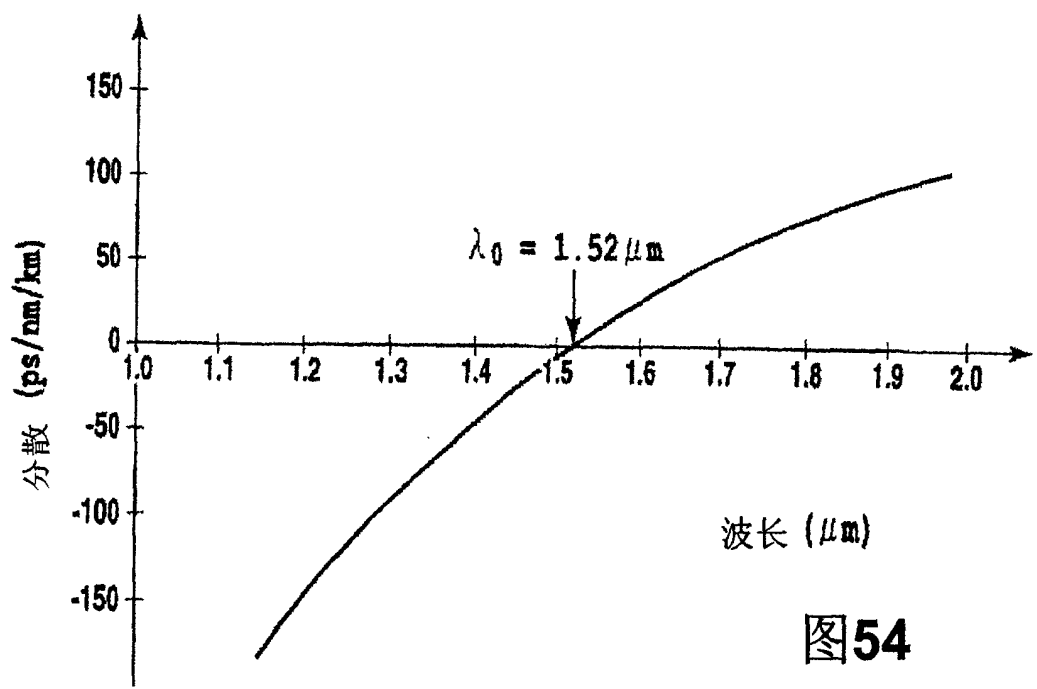


图54

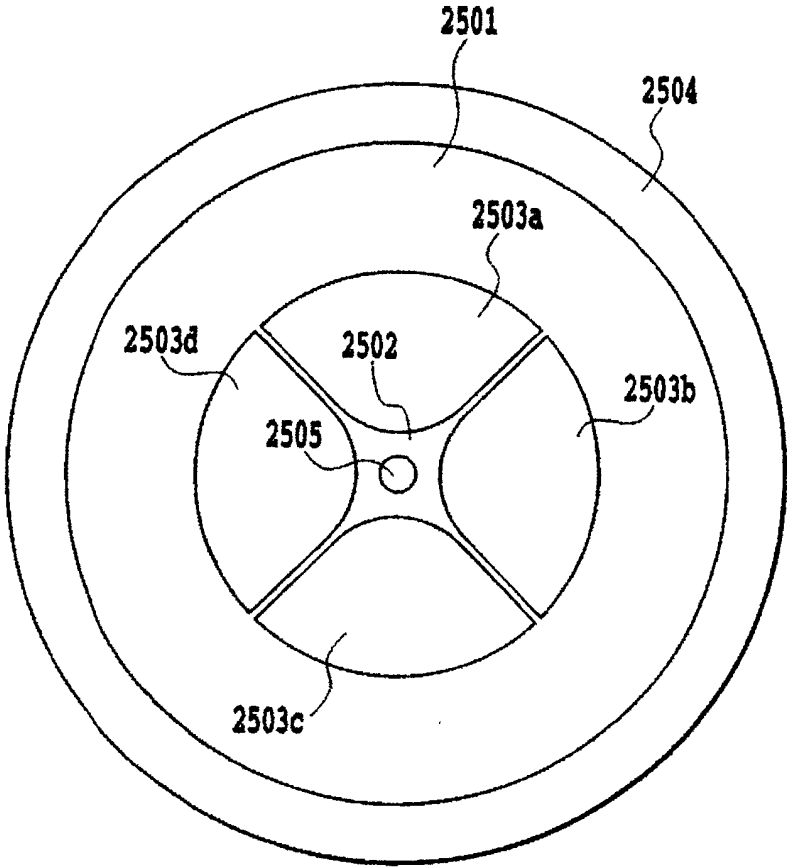


图55

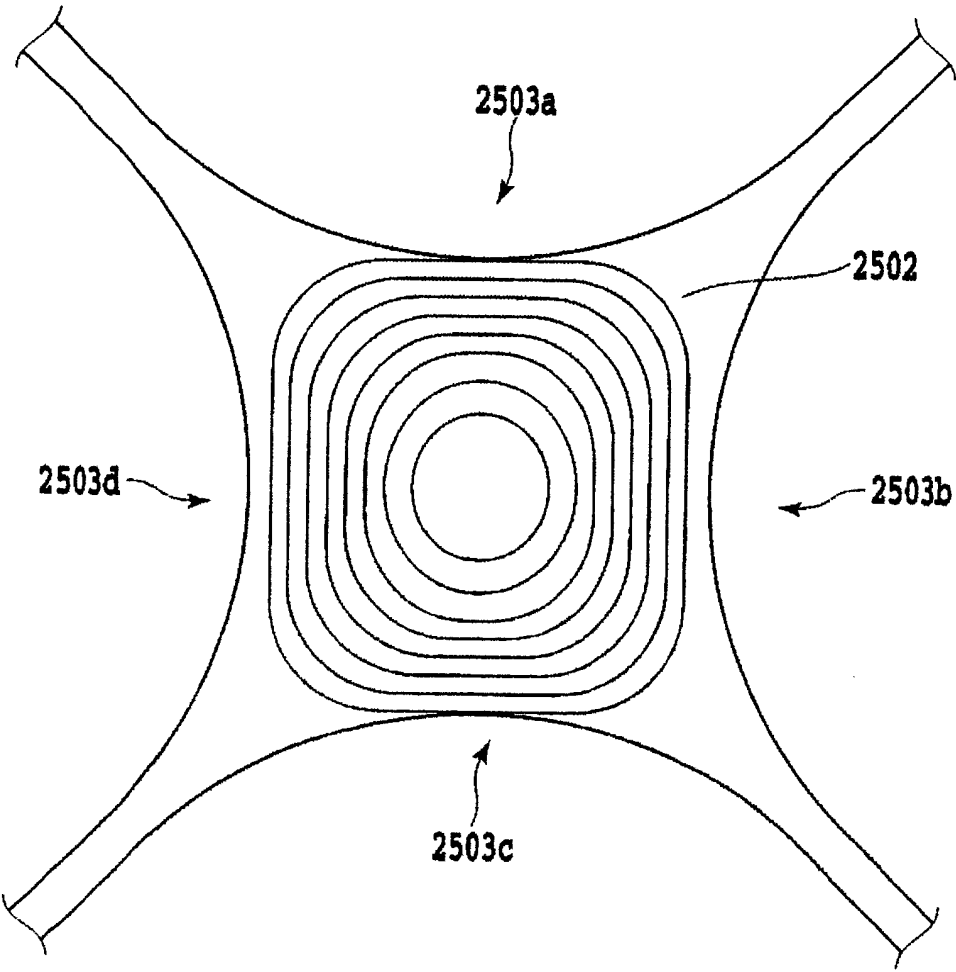


图56

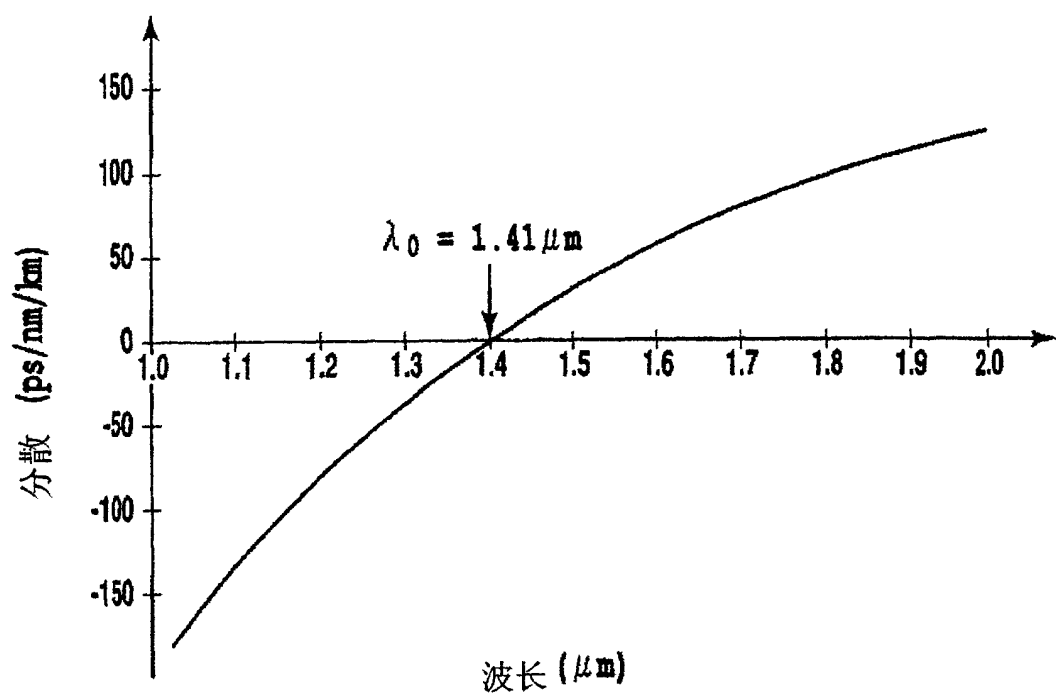


图57

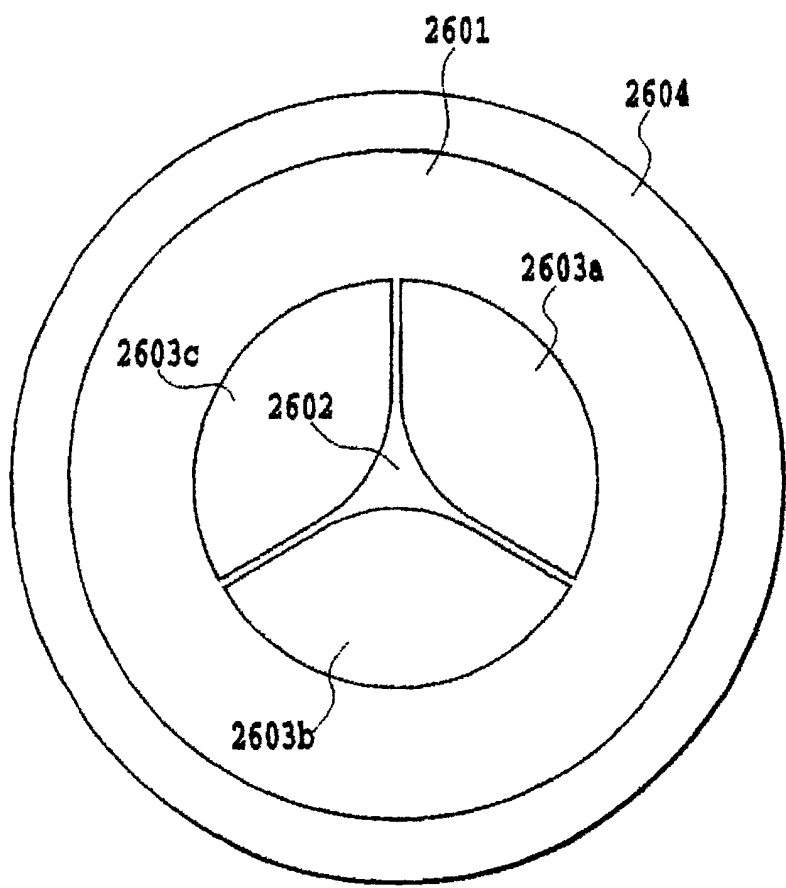


图58

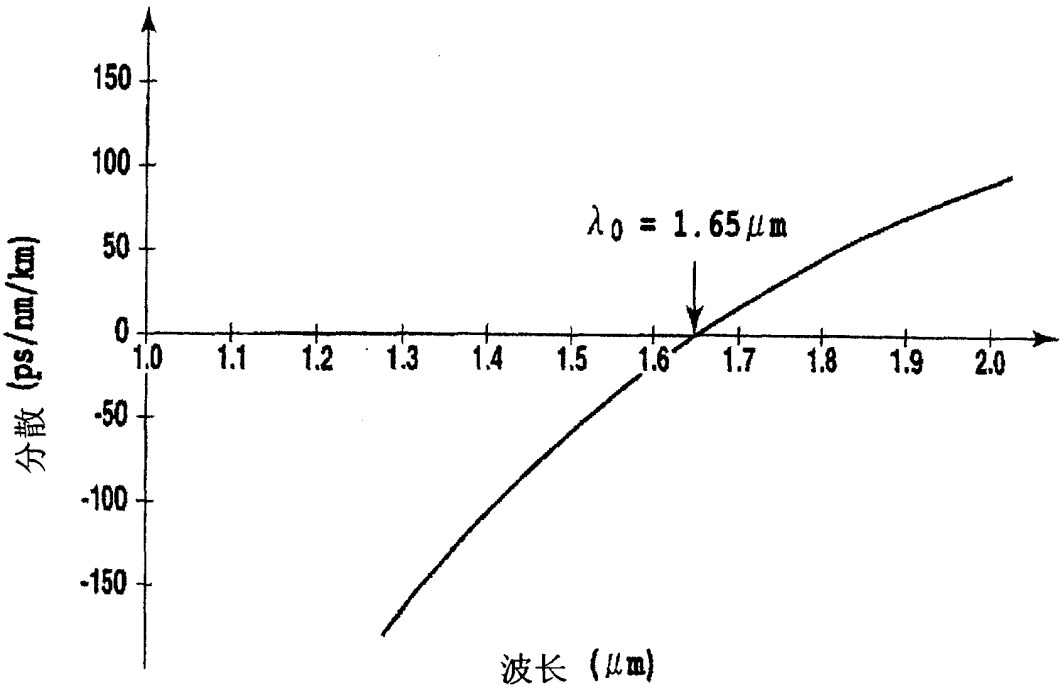


图59

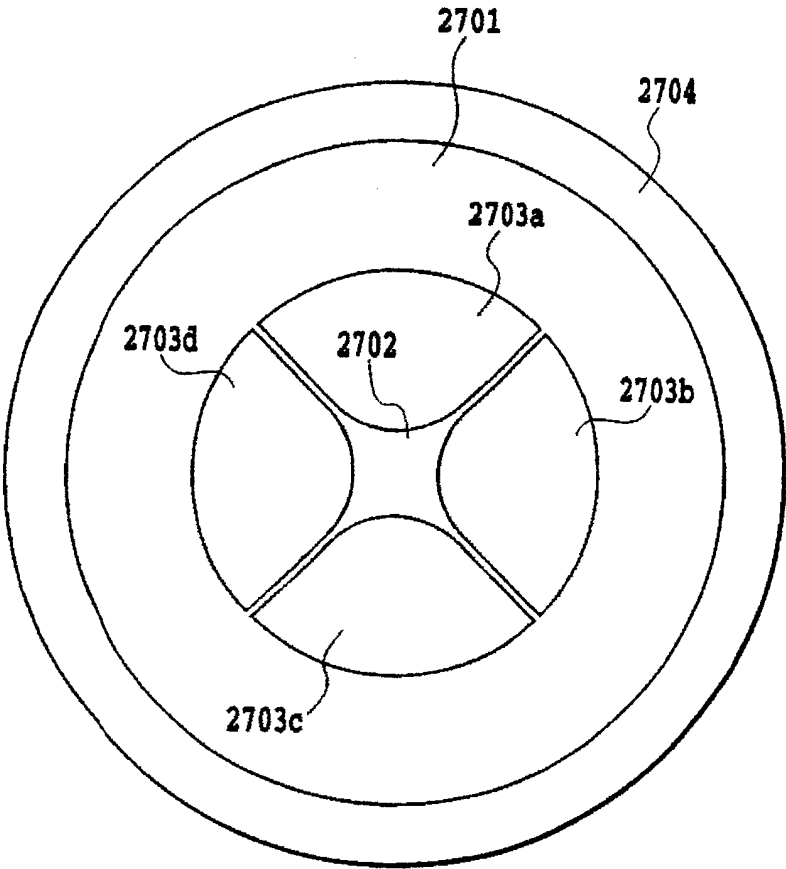


图60

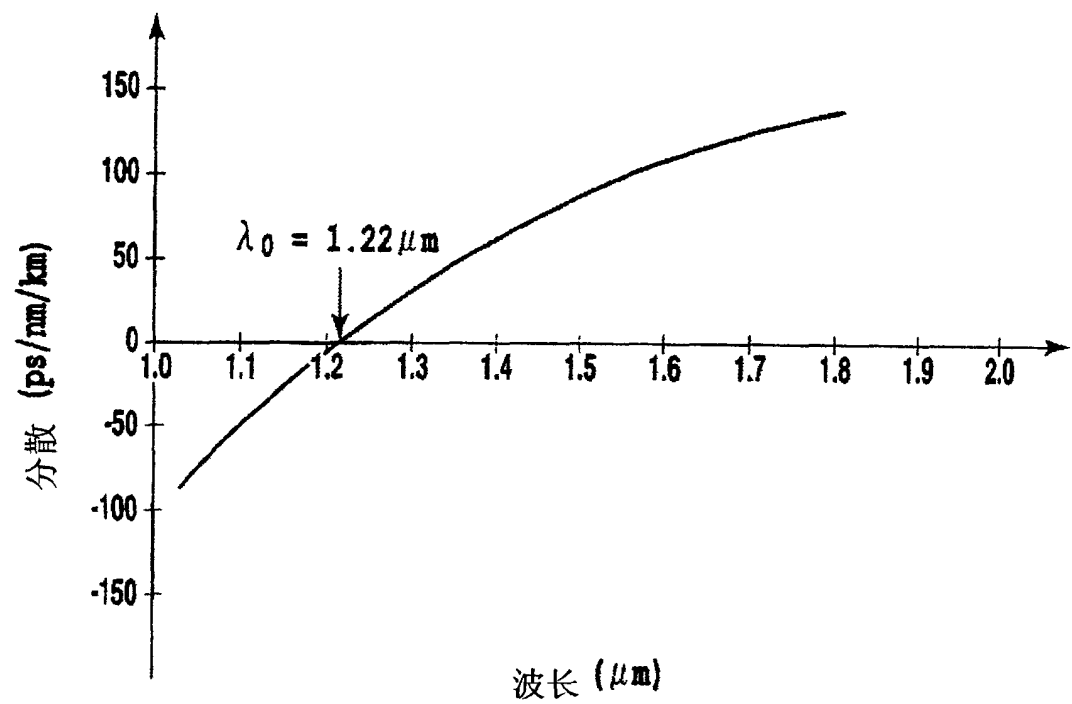


图61

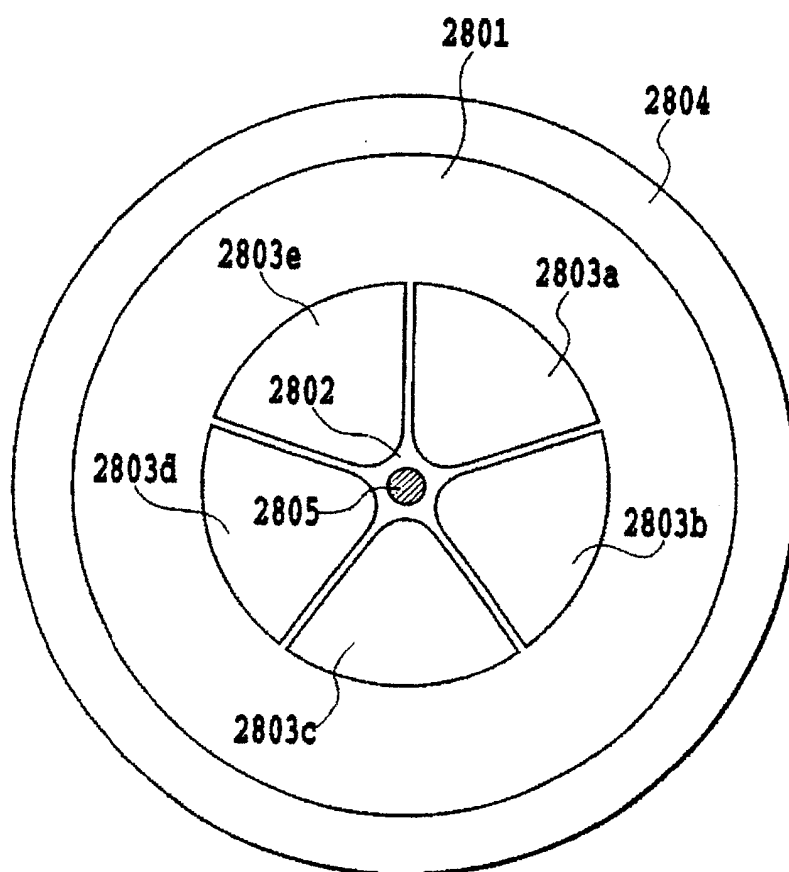


图62

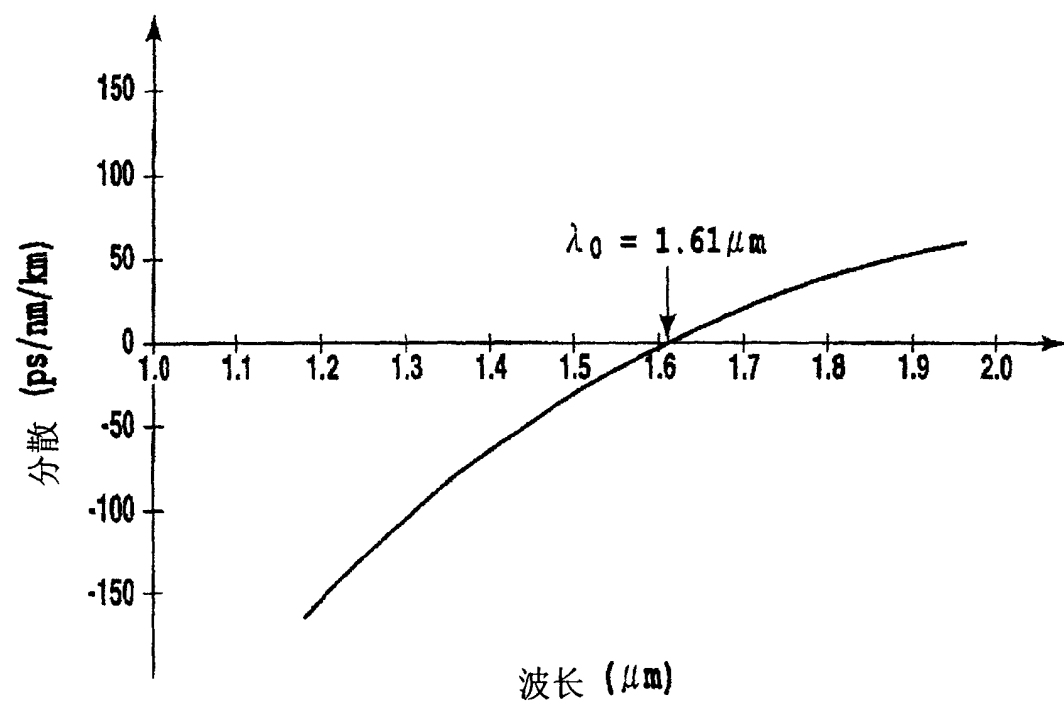


图63

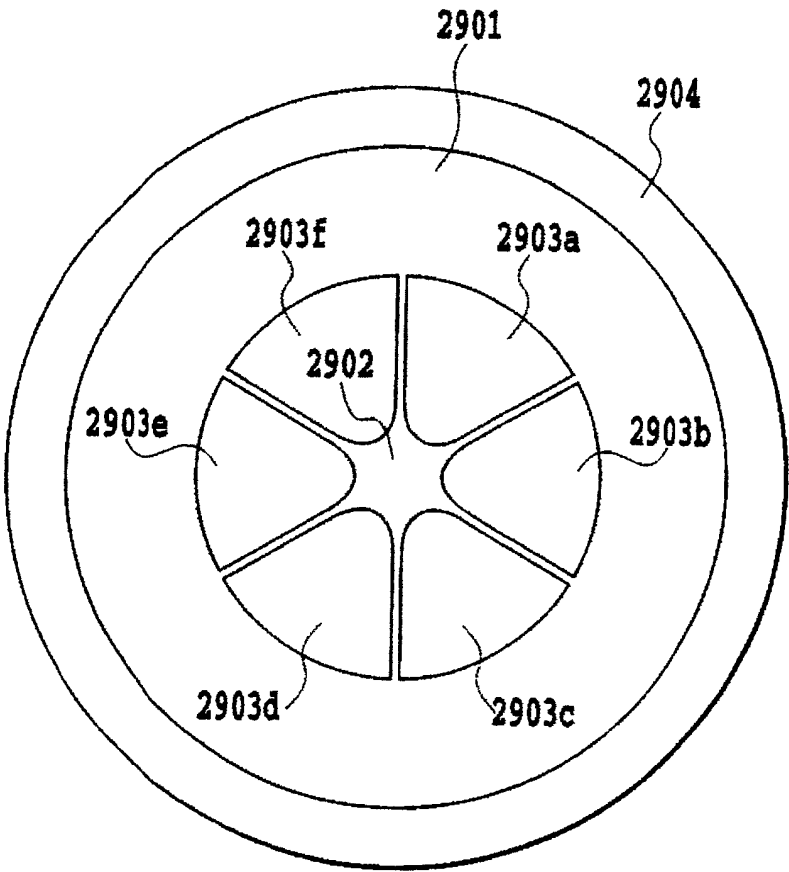


图64

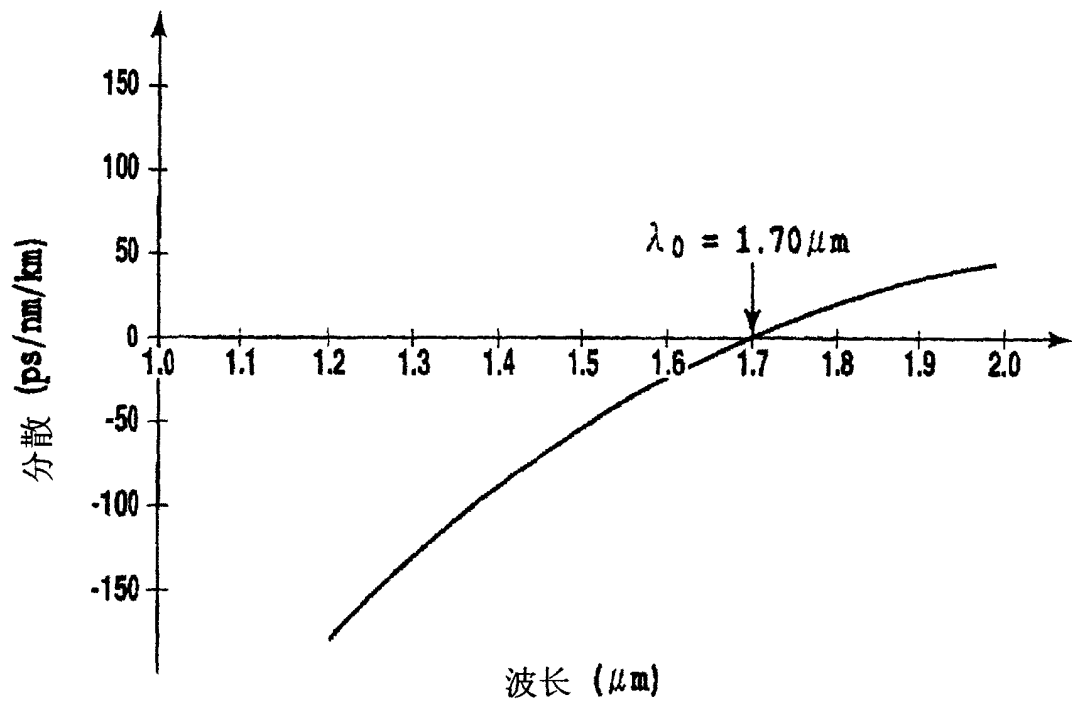


图65

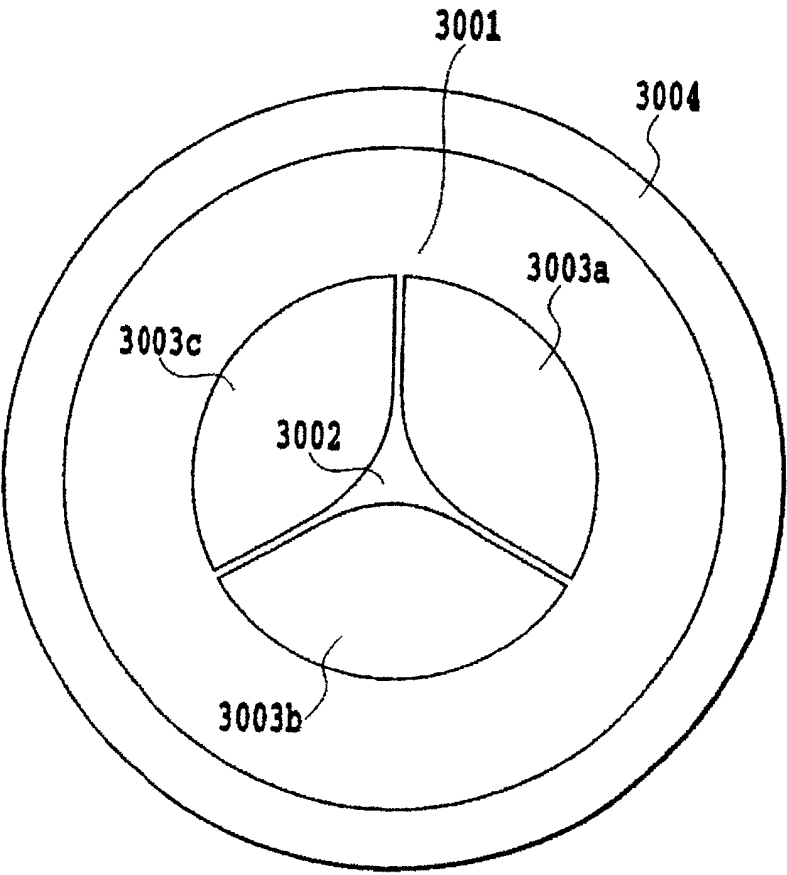


图66

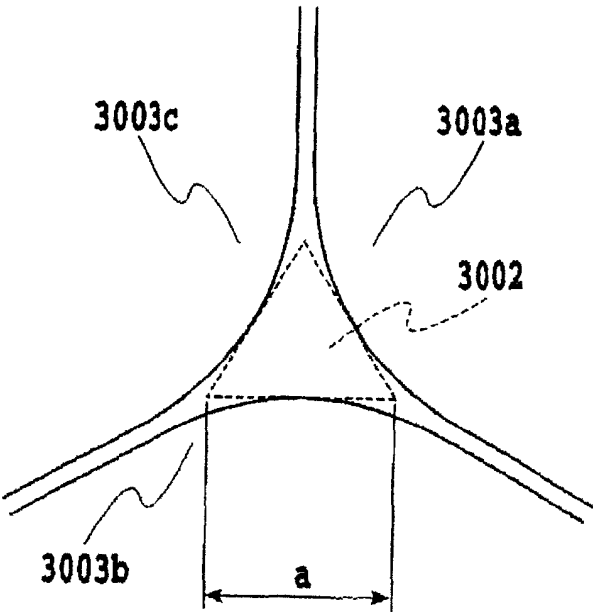


图67

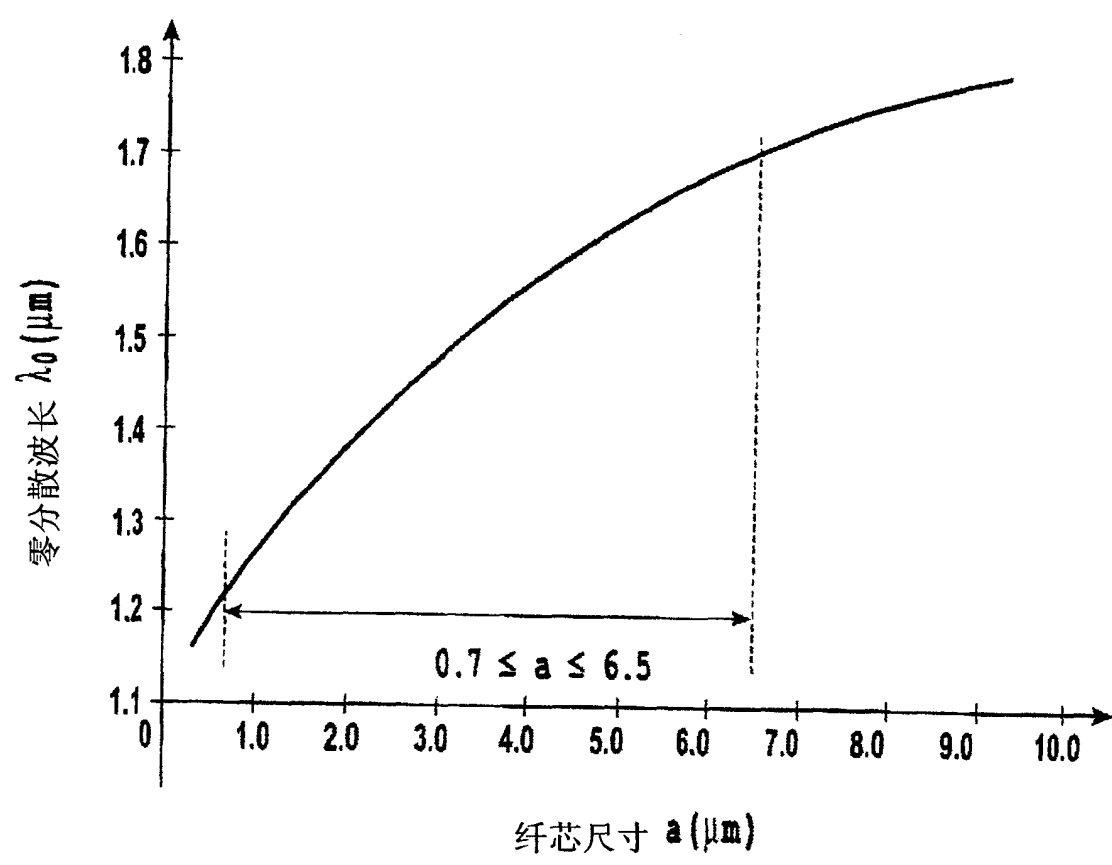


图68

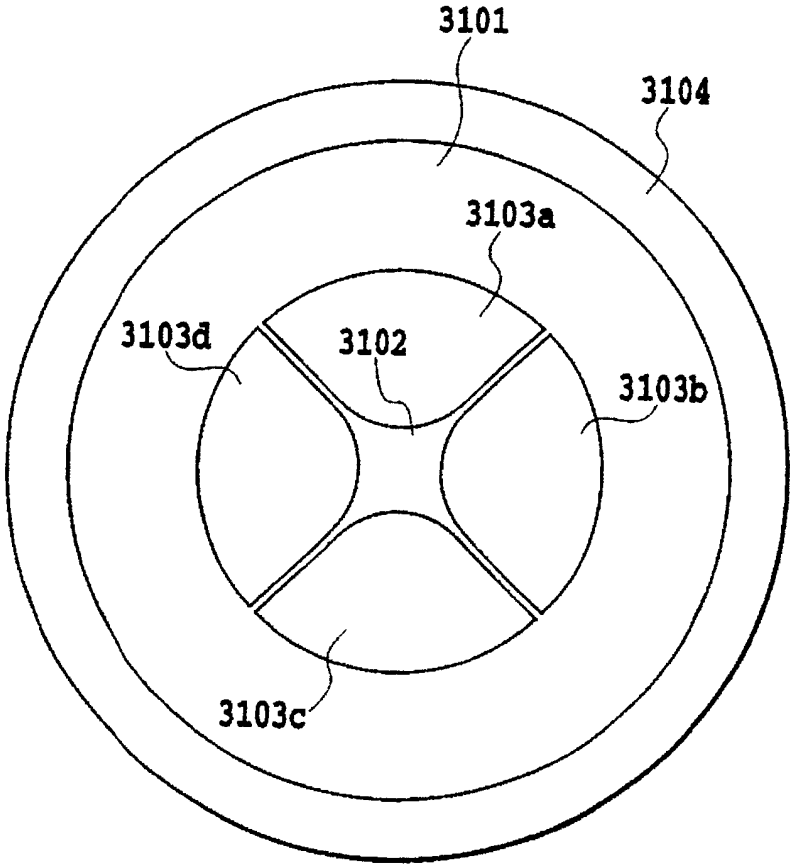


图69

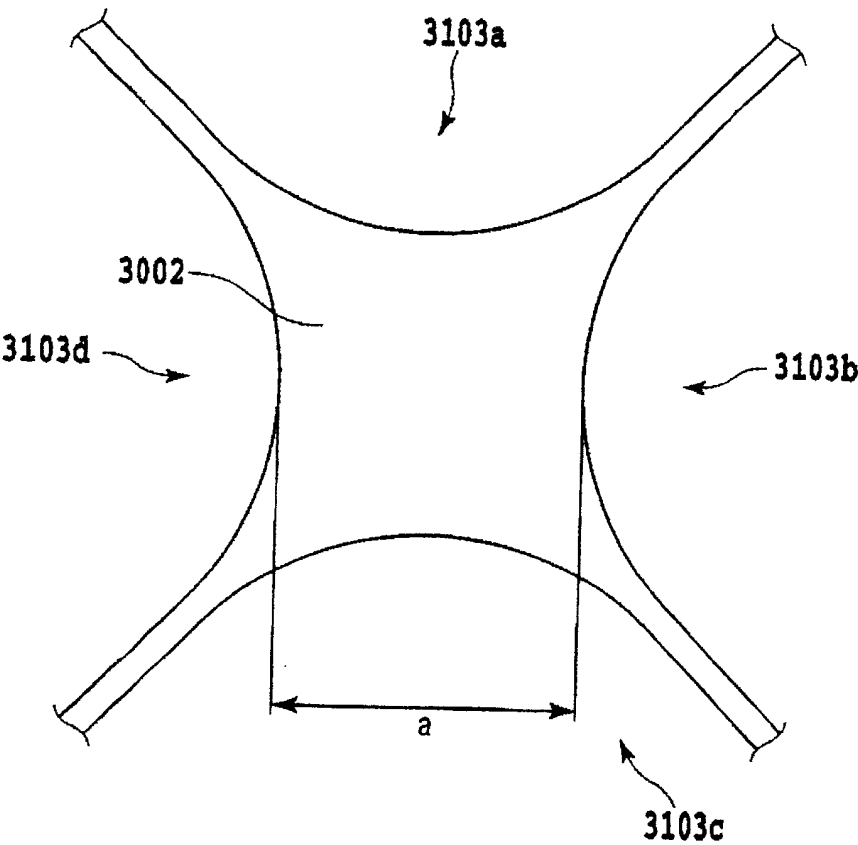


图70

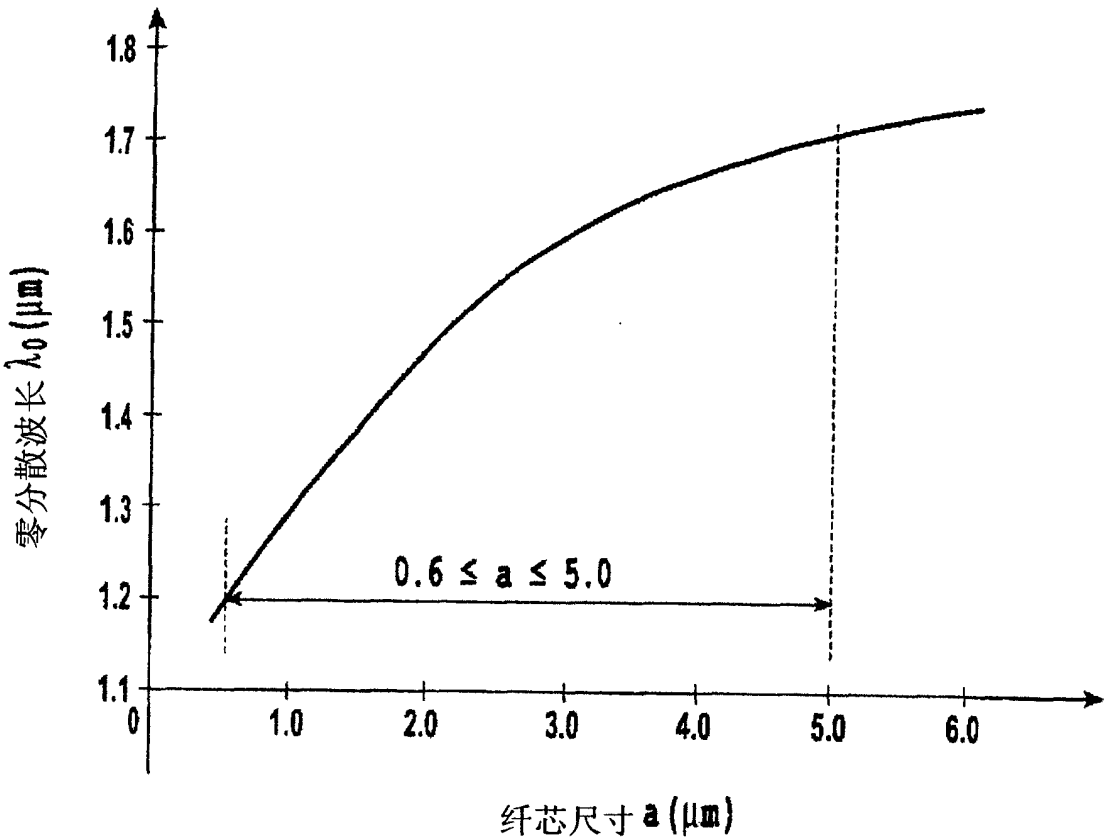


图71

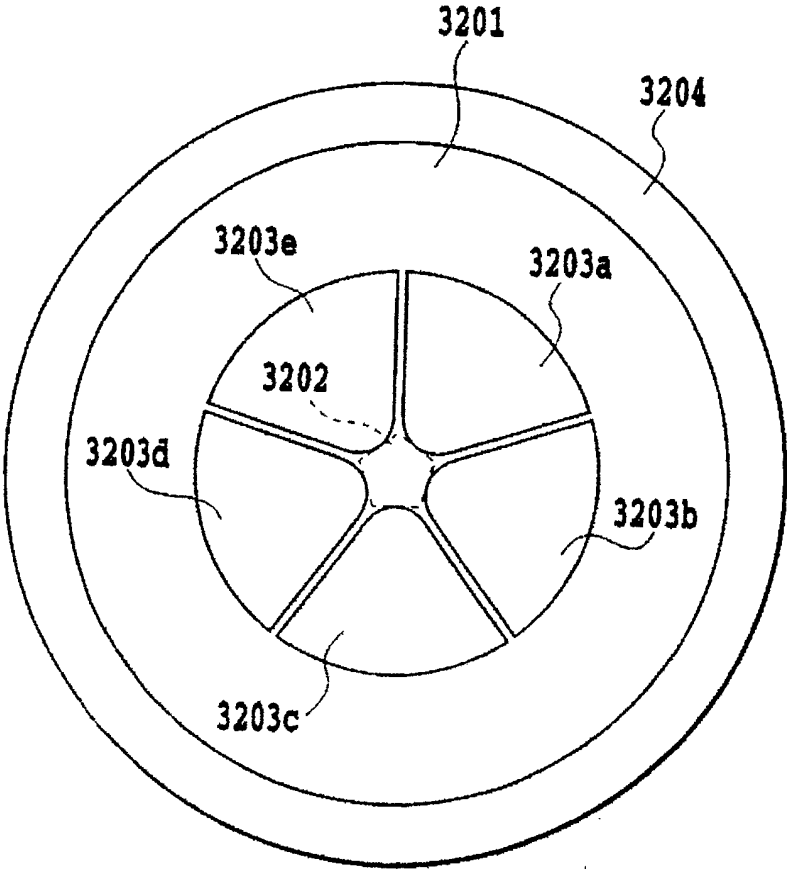


图72

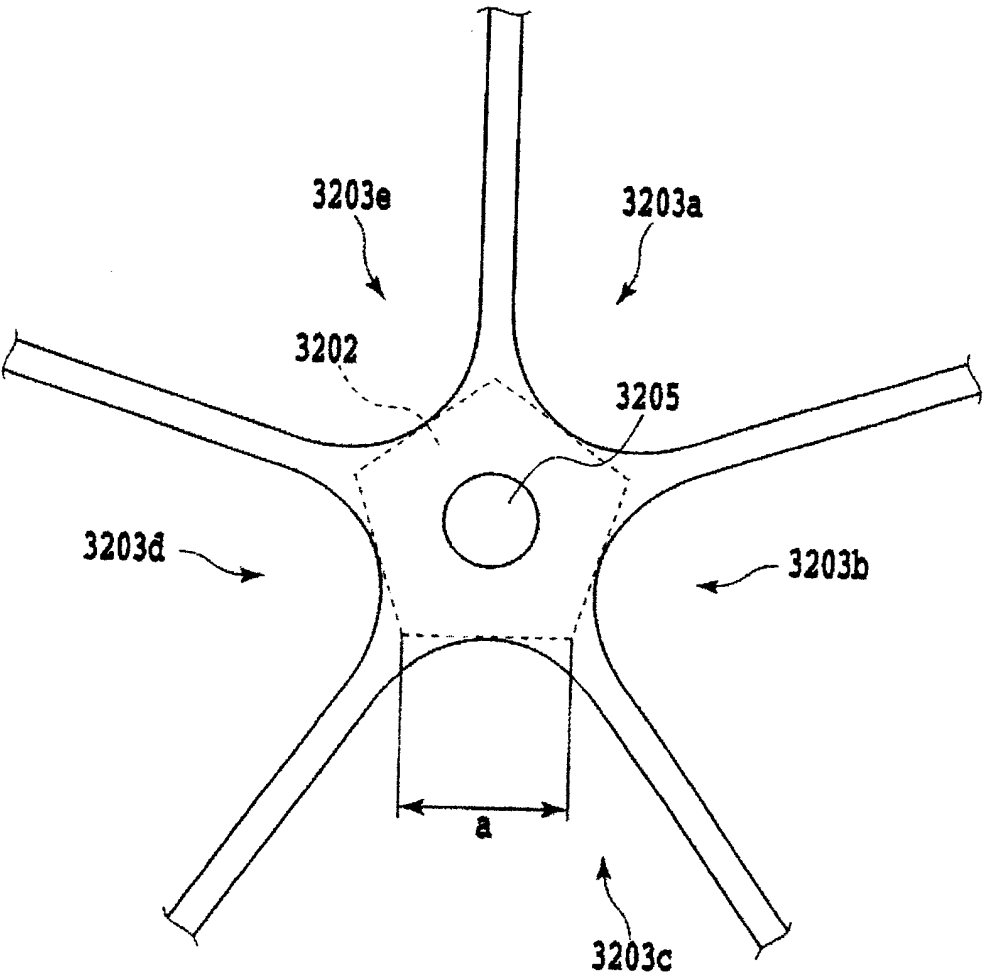


图73

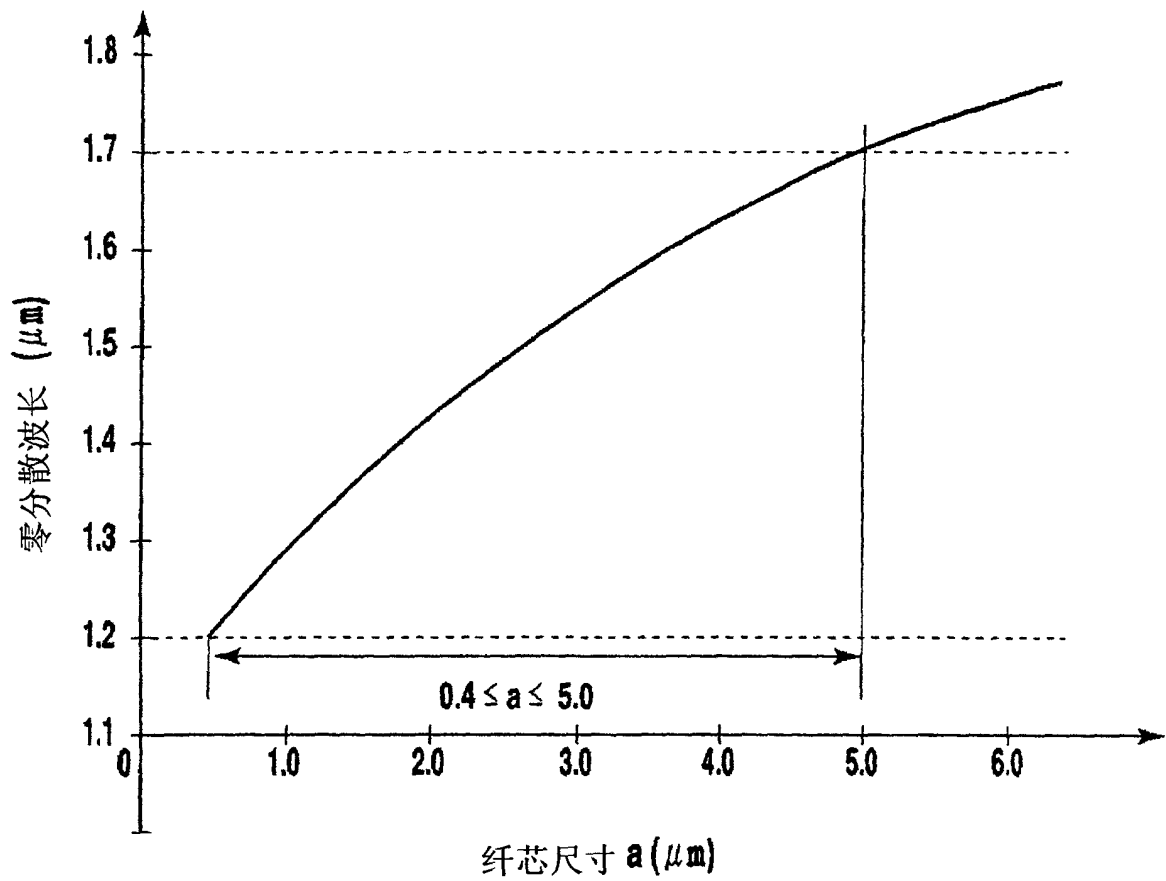


图74

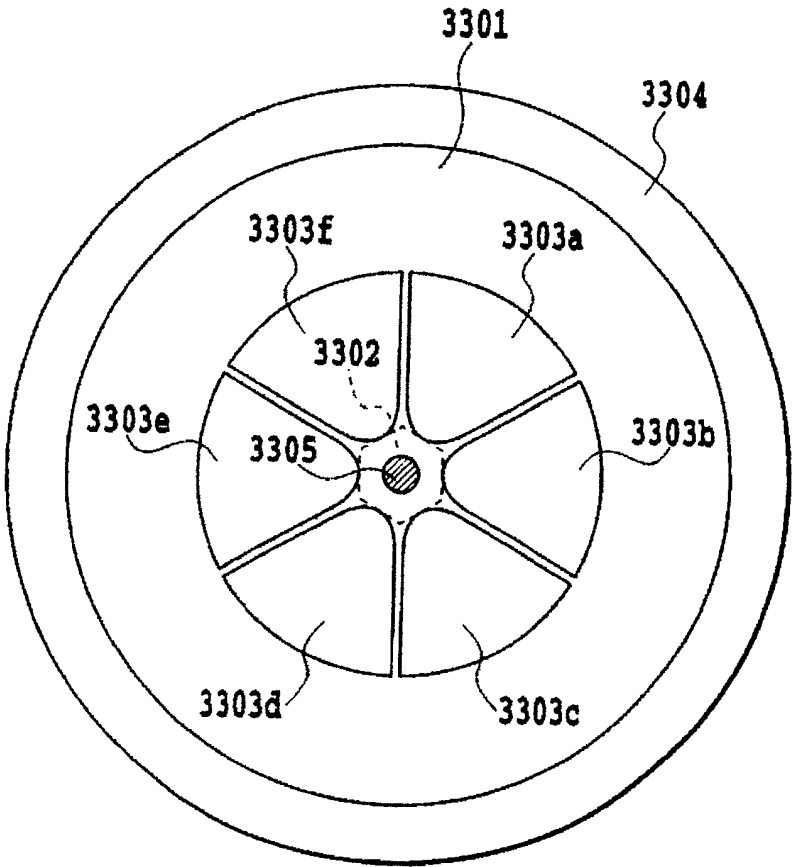


图75

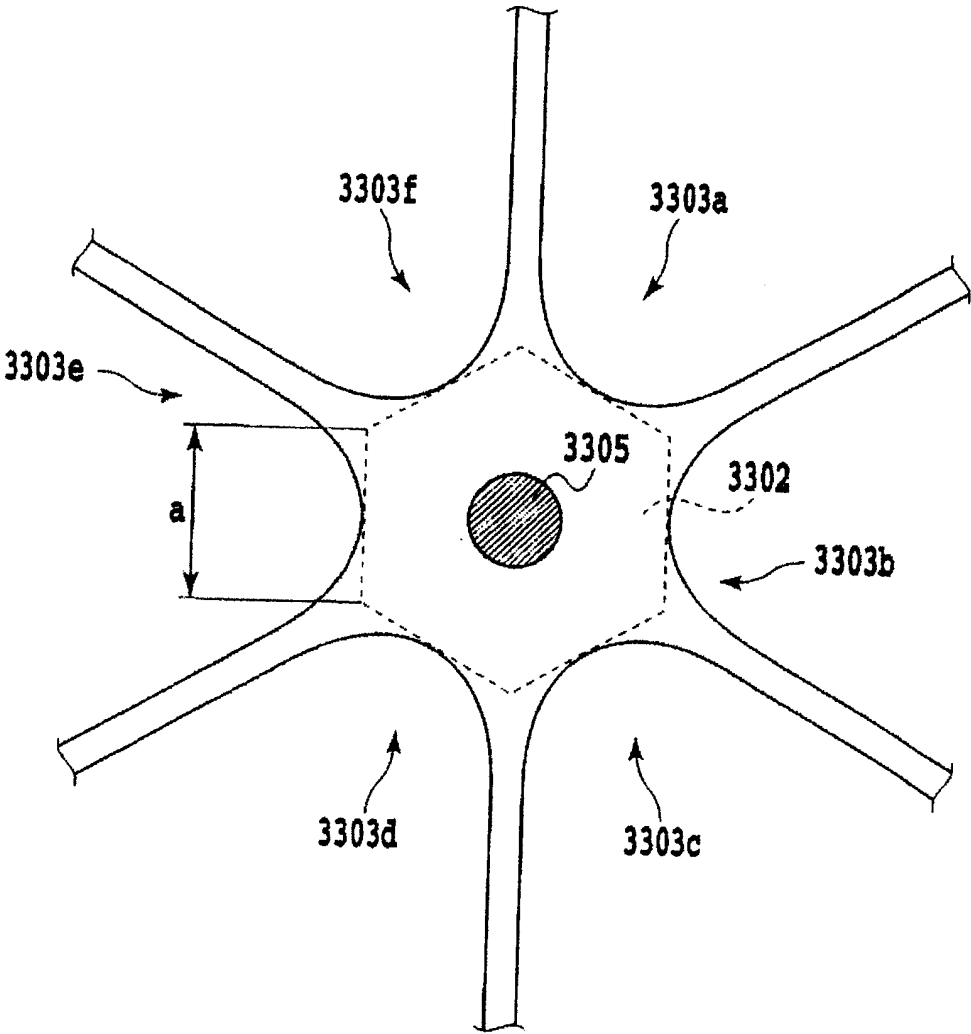


图76

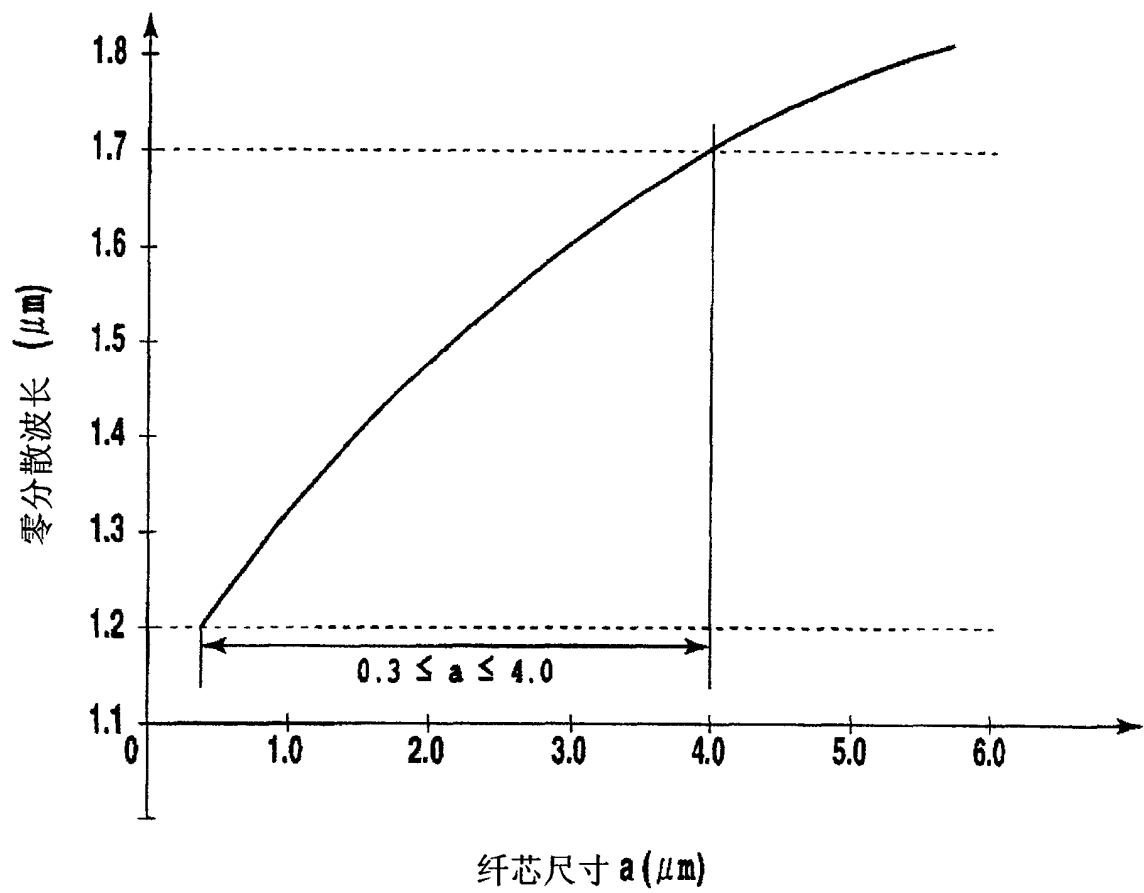


图77