



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 103246014 B

(45) 授权公告日 2015. 12. 23

(21) 申请号 201310097062. 4

(22) 申请日 2008. 08. 28

(30) 优先权数据

60/975, 478 2007. 09. 26 US

61/086, 433 2008. 08. 05 US

(62) 分案原申请数据

200880109040. 2 2008. 08. 28

(73) 专利权人 IMRA 美国公司

地址 美国密歇根州

(72) 发明人 董梁 李军 H·麦凯 傅立斌

A·马辛科维奇欧斯

(74) 专利代理机构 北京同恒源知识产权代理有

限公司 11275

代理人 王维绮

(51) Int. Cl.

G02B 6/036(2006. 01)

G02B 6/024(2006. 01)

G02F 1/39(2006. 01)

(56) 对比文件

US 2006/0088261 A1, 2006. 04. 27, 说明书
0054-0124 段, 附图 1-22.

US 5032001, 1991. 07. 16, 全文.

US 5175785 A, 1992. 12. 29, 全文.

US 2005/0069269 A1, 2005. 03. 31, 全文.

US 5353363 A, 1994. 10. 04, 全文.

US 5452394 A, 1995. 09. 19, 全文.

US 2004/0233941 A1, 2004. 11. 25, 全文.

审查员 张中青

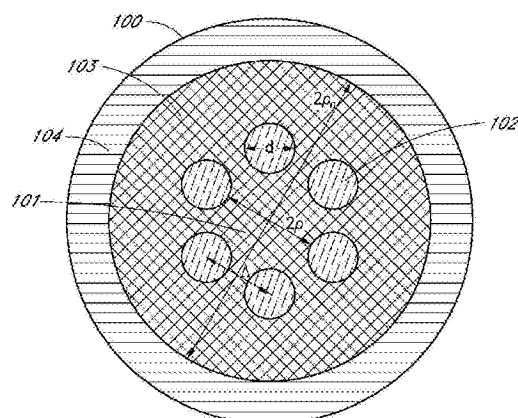
权利要求书2页 说明书27页 附图47页

(54) 发明名称

玻璃大芯径光纤

(57) 摘要

光纤的实施例可以包括包层结构, 所述包层结构包括相对于在其中设有包层结构的包层材料可产生极低相对折射率差的材料(例如, 氟掺杂的石英玻璃)。该相对折射率差可被表征为 $(n_1 - n_2)/n_1$, 其中 n_1 是其中包括由包层结构的包层材料的折射率, 而 n_2 是包层结构的折射率。在某些实施例中, 相对折射率差可能小于大约 4.5×10^{-3} 。在不同的实施例中, 包层结构的构造包括, 例如, 包层结构的尺寸和间距, 可被选择以便提供对基模的限制, 仍然允许二阶模和较高阶模的泄漏, 它可以提供模式过滤, 单模传播, 和 / 或低弯曲损耗。



1. 一种光纤,包括:

第一包层区域,所述第一包层区域包括具有第一折射率 n_1 的第一包层材料;

设置在所述第一包层区域中的包层结构,所述包层结构包括具有第二折射率 n_2 的第二包层材料,其中 n_2 小于 n_1 ,并且其中所述包层结构具有尺寸 d 和中心到中心的间距 Λ ,并且 d/Λ 的比率在 0.3-0.9 的范围内,所述包层结构包括设置在第一包层区域的多个孔;和

至少部分由所述包层结构环绕的纤芯区域,所述第一包层区域和所述包层结构被设置成使得所述纤芯区域传播具有一波长的至少一个较低阶模,同时通过在所述波长下使至少一个较高阶模比至少一个较低阶模具有更高的损耗来限制具有所述波长的至少一个较高阶模的传播。

2. 根据权利要求 1 所述的光纤,其中,所述至少一个较高阶模的损耗为至少 1dB/m。

3. 根据权利要求 1 所述的光纤,其中,所述光纤被设置为全玻璃泄漏信道光纤。

4. 根据权利要求 1 所述的光纤,

其中所述第一包层材料包括第一玻璃,所述第一玻璃包括熔融石英;和,

其中所述第二包层材料包括第二玻璃,所述第二玻璃包括氟掺杂的石英玻璃或硼掺杂的石英玻璃。

5. 根据权利要求 1 所述的光纤,其中,第一包层区域的尺寸在 $125\ \mu\text{m}$ - $300\ \mu\text{m}$ 的范围内。

6. 根据权利要求 1 所述的光纤,其中,纤芯区域的尺寸在 $30\ \mu\text{m}$ - $200\ \mu\text{m}$ 的范围内。

7. 根据权利要求 1 所述的光纤,其中,光纤输出的模态分布在所述模态分布的半功率区域的主要部分是近似衍射极限的。

8. 根据权利要求 1 所述的光纤,其中,至少一个包层结构是非旋转对称的。

9. 根据权利要求 1 所述的光纤,其中,由 $(n_1-n_2)/n_1$ 表征的相对折射率差小于 4.5×10^{-3} 。

10. 根据权利要求 9 所述的光纤,其中,所述相对折射率差小于 1.0×10^{-3} 。

11. 根据权利要求 1 所述的光纤,还包括设置在第一包层区域之外的泵浦包层。

12. 根据权利要求 11 所述的光纤,其中,所述泵浦包层包括低折射率玻璃。

13. 根据权利要求 12 所述的光纤,其中,所述低折射率玻璃包括氟。

14. 根据权利要求 11 所述的光纤,其中,所述泵浦包层包括一层气孔。

15. 根据权利要求 1 所述的光纤,其中,所述光纤包括提供光增益的掺杂纤芯区域、泵浦包层、和泵浦传导件,并且其中所述泵浦包层或所述泵浦传导件的至少一部分包括非圆形部分,所述非圆形部分被设置成增大入射到所述泵浦包层上的泵浦光束的模式混合。

16. 根据权利要求 1 所述的光纤,其中,所述比率 d/Λ 在 0.4 - 0.8 的范围内。

17. 根据权利要求 1 所述的光纤,其中,所述比率 d/Λ 被选择至少部分以提供由 $(n_1-n_2)/n_1$ 表征的相对折射率差在纤芯区域的至少一部分内小于 5×10^{-4} ,但所述相对折射率差足够大到引起在所述纤芯区域的至少一部分内进行基模的折射率引导。

18. 根据权利要求 17 所述的光纤,其中,所述第一包层材料具有第一热膨胀系数,所述第二包层材料具有第二热膨胀系数,并且所述第一热膨胀系数和第二热膨胀系数被选择至少部分以提供相对折射率差。

19. 根据权利要求 1 所述的光纤, 其中, 所述第一包层区域还包括应力元, 所述应力元具有不同于第一折射率和第二折射率的折射率。

20. 根据权利要求 1 所述的光纤, 与包括单模或少模光纤的输入光纤结合, 权利要求 1 所述的光纤被设置成大芯径泄漏信道光纤, 其中所述纤芯区域的尺寸在 $30\ \mu\text{m}$ – $200\ \mu\text{m}$ 的范围内, 所述大芯径泄漏信道光纤的输入端被设置成与所述输入光纤的输出端耦合, 所述输入光纤的输出端和所述大芯径泄漏信道光纤的输入端被设置成使得 (i) 所述输入光纤的纤芯在所述输出端处是可膨胀的, 和 (ii) 从所述输入光纤的可膨胀纤芯耦合到所述泄漏信道光纤的光信号功率大于通过对接耦合可获得的功率。

21. 一种光纤系统, 包括:

光脉冲源;

单模或少模输入光纤, 所述输入光纤被设置成接收来自所述源的脉冲; 和

权利要求 1 所述的光纤光学耦合至所述输入光纤并被设置成接收来自所述输入光纤的脉冲,

权利要求 1 所述的光纤和所述输入光纤结合的方式为, 使得所述输入光纤的纤芯膨胀并且从所述输入光纤纤芯耦合到所述纤芯区域的功率大于通过对接耦合可获得的功率, 并且所述输入光纤输出端的模式密切匹配权利要求 1 所述的光纤的基模。

22. 根据权利要求 21 所述的光纤系统, 其中, 至少一个单模或少模输入光纤和权利要求 1 所述的光纤是稀土掺杂的并且被设置为增益光纤以便放大在其中传播的脉冲。

23. 一种激光雷达, 包括权利要求 21 所述的光纤系统。

24. 一种材料加工系统, 包括权利要求 21 所述的光纤系统。

25. 一种通信系统, 包括权利要求 21 所述的光纤系统。

26. 一种光纤放大器系统, 包括:

光脉冲源, 所述光脉冲源提供具有接近衍射极限的输入空间分布的光脉冲;

光泵浦源; 和

权利要求 1 所述的光纤, 其中, 所述纤芯区域的至少一部分是稀土掺杂的, 所述光纤还包括泵浦包层, 所述泵浦包层被设置成从所述光泵浦源接收泵浦能量, 以及泵浦传导件, 所述泵浦传导件将一部分所接收的泵浦能量传输到所述纤芯区域, 所述光纤被设置成接收所述脉冲并且放大所述脉冲以便产生具有接近衍射极限的输出空间分布的输出脉冲, 并且至少一个输出脉冲的能量在 $10\ \mu\text{J}$ – 10mJ 的范围内。

27. 根据权利要求 26 所述的光纤放大器系统, 其中, 所述输出脉冲的重复率超过 1kHz 。

28. 根据权利要求 26 所述的光纤放大器系统, 其中, 至少一个输出脉冲的脉冲宽度低于 1ns 。

29. 一种基于激光的材料加工系统, 包括:

权利要求 26 所述的光纤放大器系统; 和

光学系统, 所述光学系统包括光束输送光学器件, 所述光学器件在材料上或材料内产生光斑, 所述光斑的光斑直径在 $1\ \mu\text{m}$ – $250\ \mu\text{m}$ 的范围内。

玻璃大芯径光纤

[0001] 对相关申请的交叉引用

[0002] 根据 35U. S. C. § 119 (e) 的规定, 本申请要求申请日为 2007 年 9 月 26 日的美国临时专利申请号 60/975, 478, 名称为“玻璃大芯径光纤”, 以及申请日为 2008 年 8 月 5 日的美国临时专利申请号 61/086, 433, 名称为“玻璃大芯径光纤”的优先权, 上述两篇专利文献的全部内容在此被结合入本文引用, 并且构成本说明书的一部分。

技术领域

[0003] 各种实施方案涉及光纤, 例如, 具有大芯径尺寸的光纤和支持单模传播的光纤, 以及使用所述光纤的装置和系统, 例如, 激光器, 放大器, 和基于激光的材料加工系统。

背景技术

[0004] 单模光纤为高质量光束提供灵活的传输媒介。传统的单模光纤通常的纤芯直径在 $9\mu\text{m}$ 以下。不过, 传统单模光纤的小纤芯直径不适于传输大功率光束。在这些光纤中传播的高光强光束可能导致较强的非线性效应, 如自相位调制, 拉曼 (Raman) 散射, 布里渊 (Brillouin) 散射等。自相位调制可能导致脉冲畸变。拉曼和布里渊散射可能导致在传输期间显著的功率损耗。

[0005] 近来, 业已发现基于稀土离子和拉曼效应的光纤激光器在许多应用中相对于它们的固态对应物具有优势, 并且改进了它们的功率水平。进一步缩放单模光纤激光器或放大器的输出功率的一个限制是非线性。不过, 通过利用更大纤芯直径的设计可以提高其上限。

[0006] 对单模光纤有需求。还需要光纤能在很大波长范围内工作。还要考虑易于使用和制造, 这可以导致使用的增加。

发明内容

[0007] 各种实施方案包括单模光纤和大芯径光纤。在某些实施例中, 光纤可以在大波长范围内工作。

[0008] 还披露了包括光纤的各种实施例, 所述光纤包括包层结构, 它包括相对于在其中设有包层结构的包层材料能够产生极低相对折射率差的材料 (例如, 掺氟石英玻璃)。该相对折射率差可以用 $(n_1 - n_2) / n_1$ 表征, 其中, n_1 是其中包括包层结构的包层材料的折射率, 而 n_2 是包层结构的折射率。

[0009] 在不同的实施例中, 包层结构的设置, 例如, 包层结构的尺寸和间距可以选择, 以便提供对基本模式的限制, 但允许第二模式和更高模式的泄漏, 以便提供模式过滤和单模传播。

[0010] 一般已知弯曲损耗性能随着低相对折光率差而恶化。该趋势通过实验和模拟得到证实。不过, 令人吃惊的是, 业已发现低相对折光率差可以获得模式过滤的显著改进, 同时弯曲损耗性能保持适当。具体地讲, 小的相对折射率差可以提供更好的模式过滤并易于使用和制造, 同时提供更高但适当的弯曲损耗。

[0011] 因此,在不同的实施例中,光纤被设置成具有至少部分由包层结构环绕的芯。所述包层包括具有折射率 n_1 的第一包层材料和由折射率为 n_2 的第二包层材料形成的包层结构,其中 $n_2 < n_1$, 并且相对折射率差 $(n_1 - n_2) / n_1$ 较小。

[0012] 在某些实施例中,极小的相对折射率差 $(n_1 - n_2) / n_1$ 提供了改进的模式过滤和足够低的弯曲损耗。

[0013] 在某些实施例中,相对折射率差可以小于约 4.5×10^{-3} 。在某些实施例中,相对折射率差可以小于约 1.0×10^{-3} 。在某些实施例中,相对折射率差可以小于约 8×10^{-4} 。

[0014] 在某些实施例中,所述结构可以提供的较高阶模损耗为至少约 1dB/m。在某些实施例中,所述结构可以提供的较高阶模损耗为至少约 5dB/m。在某些实施例中,所述结构可以提供的较高阶模损耗为至少约 10dB/m。

[0015] 在某些实施例中,光纤直径可被设置成具有低损耗的基模,同时增大较高阶模损耗。例如,在不同的实施例中,基模的损耗可以为大约 0.1dB/m 或以下,而在某些实施例中较高阶模式的损耗可以为大约 1dB/m 或以上。在其它实施例中,基模的损耗可以为大约 1dB/m 或以下,而在某些实施例中较高阶模式的损耗可以为大约 10dB/m 或以上。

[0016] 在某些实施例中,光纤的弯曲半径为 10cm 或更大。

[0017] 在某些实施例中,光纤可以是“全玻璃”。芯,其中设有包层结构的包层材料,以及包层结构可以包括至少覆盖在部分光纤长度上的玻璃。

[0018] 在不同的实施例中,光纤设计可以包括泄漏信道光纤(LCF),其中,改进了较高阶模式的泄漏,光子晶体光纤,无尽单模光子晶体光纤(它的波长范围大于 500nm 或大于 1000nm,例如,它的波长范围至少从 458nm-1550nm),和 / 或大芯径设计。

[0019] 在至少一个实施例中,光纤包括由多个玻璃结构环绕的芯,其中,玻璃结构的位置、形状和尺寸提供单模操作,并且对光纤的第二模式损耗为至少约 1dB/m。

[0020] 在至少一个实施例中,光纤包括由多个第二玻璃结构环绕的芯,所述第二玻璃结构在第一包层材料中排列成规则或不规则阵列,其中,所述结构的位置、形状和尺寸提供单模操作,并且其中相对折射率差小于约 4.5×10^{-3} 。在某些实施例中,相对折射率差小于约 1.0×10^{-3} 。

[0021] 在至少一个实施例中,光纤包括由多个第二玻璃结构环绕的芯,所述第二玻璃结构在第一包层材料中排列成规则或不规则阵列,其中,所述结构的位置、形状和尺寸提供在大范围波长内(例如,至少约 500 纳米)的单模操作,并且其中相对折射率差小于约 4.5×10^{-3} 。在某些实施例中,波长范围可以为 500-1000nm,例如,800nm。在某些实施例中,相对折射率差小于约 1.0×10^{-3} 。

[0022] 在至少一个实施例中,光纤被设置成在较高阶模式和基模之间产生大的微分模式损耗。例如,在某些实施例中,第一阶模式的损耗可以为大约 0.1dB/m 或以下,而较高阶模式的损耗可以为大约 1dB/m 或以上。

[0023] 至少一个实施例包括一种光纤,它用于传播具有一波长的至少一个较低阶模式(例如,基模),同时限制传播具有所述波长的较高阶模式,这通过在所述波长上使所述较高阶模式具有比所述至少一个较低阶模式更高的损耗来实现。光纤可以包括:第一包层区域,包括折射率为 n_1 的材料;第二包层区域,包括一个或多个包层结构,所述包层结构包括折射率为 n_2 的材料;和纤芯区域,它至少部分由所述第二包层区域环绕。包层结构被设置成显

著限制所述较低阶模式向芯区域的传播。包层结构包括产生低相对折射率 $\Delta_c = (n_1 - n_2)/n_1$ 的材料,而至少一个较高阶模式的损耗为至少约 1dB/m。在某些实施例中,至少一个较高阶模式的损耗为至少约 5dB/m。

[0024] 在不同的实施例中,光纤具有正交于光纤长度的六边形截面。六边形截面可以具有圆角。在某些实施例中,光纤可以是双包层光纤,其中,所述光纤的外六边形周边形成区域的反射边界,用于引导泵浦。所述双包层光纤的截面具有带圆角的六边形形状,可能有利于泵浦模式混合。由于绝对的圆形边界,会有斜射光不通过中央的掺杂芯。具有六边形边界的某些实施例不允许所述模式存在或减少了所述模式的存在,并且可以至少增加通过芯的光量。

[0025] 在不同的实施例中,包层结构是掺杂的,并且具有比背景包层材料更低的折射率,其中包层结构设置在背景包层材料中。

[0026] 至少一个实施例包括一种光纤,它具有第一包层材料和第一折射率 n_1 。包层结构设置在第一包层材料中。第二包层的包层结构具有第二折射率 n_2 。至少一个包层结构是非旋转对称的。预先选定的外径和结构间的相对间距可以使较高阶模式损耗比基模损耗大至少约 5dB。可在光纤输出测得的模态分布可以在模态分布的至少中央部分的实质部分上受到近似衍射限制,例如,在半功率或 $1/e^2$ 强度点间的部分。

[0027] 芯可以是稀土掺杂的,以便提供光增益媒介。本发明的不同实施例可用于激光放大器,激光器,短或超短脉冲发生器,Q 开关激光器和其它系统。

[0028] 在不同的实施例中,光纤包括第一包层区域,它包括具有第一折射率 n_1 的第一包层材料。光纤还包括第二包层区域,它包括一个或多个包层结构,所述包层结构包括具有第二折射率 n_2 的第二包层材料。光纤还包括芯区域,它至少部分由第二包层区域环绕。第一和第二包层区域可被设置成使得芯区域传播至少一个较低阶模式。在至少一个实施例中,第一包层区域的尺寸和包层结构的尺寸、排列和数量中的一个或组合提供了较高阶模式损耗大于基模损耗。

[0029] 不同的实施例可以包括光纤放大器系统或光纤激光器,产生高峰值功率,接近衍射极限脉冲。举例来说,输出脉冲能量可以在大约 $10 \mu\text{J}$ - 10mJ 的范围内,或大约 $100 \mu\text{J}$ - 1mJ 。输出脉冲宽度可以小于 1ns 并且以超过 1KHz 的重复频率产生。输出脉冲可以没有与非线性效应相关的变形。例如,在某些实施例中,一种光纤放大器系统包括光脉冲源,提供光脉冲,所述光脉冲具有接近衍射极限的输入空间分布,光泵浦源,和本文所披露的任何光纤。在某些所述实施例中,光纤的芯区域的至少一部分是稀土掺杂的。光纤还可以包括泵浦包层,它被设置成从光泵浦源接收泵浦能量;和泵浦引导件,以便将部分接收到的泵浦能量传输到芯区域。光纤可被设置成接收脉冲并且放大脉冲,以便产生输出脉冲,所述输出脉冲具有接近衍射极限的输出空间分布,并且至少一个输出脉冲具有的能量在大约 $10 \mu\text{J}$ - 大约 10mJ 的范围内。

[0030] 本文所披露的不同实施例的光纤可以包括大芯径、全玻璃光子晶体光纤(PCF),它具有两层或多层包层结构。

[0031] 在某些实施例中,LCF 或 PCF 可被设置如下:基模被导入具有不均匀折射率的芯的一部分内,所述不均匀折射率例如是抛物线折射率变化。模场直径可能是 LCF 纤芯直径的一部分,例如大约 50%。

[0032] 在不同的实施例中,全玻璃 LCF 可以设置如下:基模被导入具有基本均匀折射率的芯的一部分内。

[0033] 在至少一个实施例中,LCF 或 PCF 可以由一种方法制成,所述方法包括:将 LCF 或 PCF 的折射率分布调整使得基模被导入芯的至少一部分内。可以利用应力光学效应来调整折射率分布。在制造光纤的一些方法中,所述方法包括确定至少一个模态限制损耗的变化和在光纤的第一包覆层区域的尺寸具有变化的模态折射率,并且选择第一包覆层区域的尺寸,以便使至少一个较高阶模式的损耗与至少一个较低阶模式的损耗的比率大于约 10。

[0034] 在至少一个实施例中,全玻璃光纤可以包括具有第一热膨胀系数的第一包覆层材料。包覆层结构由具有第二热膨胀系数的第二包覆层材料制成。包覆层结构可以设置在第一包覆层材料中。折射率的局部增加可以出现在靠近包覆层结构的区域。由包覆层结构的第一内层限制的芯区域可以具有不均匀折射率分布,使得芯部分内的相对折射率差小于约 1.0×10^{-3} 。折射率差可以足够将基模导入芯的至少一部分内,例如通过折射率引导机构。

[0035] 不同的实施例可以包括大芯径全玻璃泄漏信道光纤(LCF)。在至少一个实施例中,全玻璃 LCF 可以包括直径在大约 $30 \mu\text{m}$ – 大约 $200 \mu\text{m}$ 范围内的纤芯。在至少一个实施例中,全玻璃 LCF 可以提供的较高阶模损耗大于基模损耗大约 1dB/m。在其它实施例中,全玻璃 LCF 可以提供的较高阶模损耗大于基模损耗大约 5dB/m。

[0036] 不同的实施例可以包括大芯径全玻璃偏振保持 LCF 或 PCF。

[0037] 偏振保持光纤的一个实施例包括第一包覆层区域,包括具有第一折射率 n_1 的第一包覆层材料;第二包覆层区域,包括一个或多个包覆层结构,所述包覆层结构包括具有第二折射率 n_2 的第二包覆层材料,其中 n_2 小于 n_1 ;并且由 $(n_1 - n_2)/n_1$ 表征的相对折射率差小于约 4.5×10^{-3} 。第二包覆层区域还包括应力元,它的折射率不同于第二折射率。光纤还包括至少部分由第二包覆层区域环绕的芯区域。第一和第二包覆层区域被设置使得芯区域传播基模并保持光束偏振,以便第一包覆层区域的尺寸以及包覆层结构的尺寸、排列和数量中的一个或组合和应力元提供的较高阶模损耗大于基模损耗,同时保持光束偏振。

[0038] 在不同的实施例中,通过预先选定第一包覆层区域的尺寸,可以使较高阶模损耗与基模损耗的比率显著最大化。在至少一个实施例中,模态限制损耗相对于第一包覆层的变化可以增大或其比率可以显著最大化。在至少一个实施例中,尺寸可以是第一包覆层区域的直径。

[0039] 不同的实施例可以包括基于激光的材料加工系统,采用光纤激光器,光纤放大器,和/或传输光纤。激光器,放大器,或传输光纤可以包括全玻璃大芯径 LCF 或 PCF。材料加工可以在光点尺寸在大约 $1 \mu\text{m}$ – 大约 $250 \mu\text{m}$ 的范围内进行。

[0040] 一些实施例可以采用“全光纤”设计,或至少减少大量光学部件数量的设置。集成设置可用于光纤激光器,光纤放大器,或光纤型传输系统。例如,可能不需要大量的光学部件,用于将能量耦合到大模放大器中。单模或少模输入光纤可以耦合至大模光纤,以便从光源输送脉冲。大模光纤和输入光纤能够以这样一种方式结合,使得从输入光纤的纤芯耦合到大模光纤的能量显著大于对接耦合可获得的能量。例如,输入光纤的纤芯可以在结合期间膨胀,例如,通过施加一个或多个电弧对光纤端进行加热。另外,输入光纤的输出端的模式可以基本匹配大模光纤的模式。

[0041] 在一些实施例中,功率耦合可以足够高,以便将耦合损耗限定在小于约 3dB。在一

些实施例中,功率耦合可以足够高,以便将耦合损耗限定在小于约 1.5dB。

[0042] 本发明的实施例可用于基于激光改性的金属、半导体和绝缘材料的系统中,采用红外线、可见光、和 / 或 UV 波长。本文所述的光纤、激光器、和 / 或放大器的实施例可用于激光雷达系统,材料加工系统,通信系统,和许多其它系统。

附图说明

[0043] 图 1-a 和 1-b 分别是侧视和剖视图,示意性地示出了泄漏信道光纤和参数节距 Λ , 孔直径 d , 芯半径 ρ , 和光纤直径 $2\rho_0$ 。示例光纤还包括涂覆层,和孔之外的包覆区域。泄漏信道光纤可以包括大气孔,用于引导光模。在本发明的至少一个实施例中,泄漏信道光纤包括商用的掺氟石英作为“全玻璃”设计中的第二包覆层材料(而不是气孔),其中在第二包覆层材料和另一包覆层材料之间产生小的相对折射率 Δ_c 。(利用玻璃包覆层结构与纤芯直径相同但包覆层结构包括气孔的情形相比,可能导致更大的包覆层结构)。

[0044] 图 1-c 是剖视图,示意性地示出了对应于本发明一个实施例的双包层偏振保持 (PM) 光纤,它具有铋掺杂的大芯径和多材料包覆层。

[0045] 图 1-d 示出了可以采用的其它包覆层结构形状。示出了各种不同的包覆层结构的剖视图,尽管包覆层结构设计并不局限于此。

[0046] 图 2 是一图表,示出了类似于图 1-b 的示例泄漏信道光纤的估计的限制损耗和模态折射率相对于 d/Λ , 其中,假设内部设置有包覆层结构的包覆层材料的直径是无穷的并且没有包覆层。相对折射率差 Δ_c (例如:折射率差比)给定如下: $\Delta_c = (n_1 - n_2)/n_1$, 其中, n_1 是背景包覆层材料(石英)的折射率,而 n_2 是孔中材料的折射率。在该例子中,假设石英玻璃的折射率在 $1.05\ \mu\text{m}$ 的示例设计波长下为 1.444, 并且相对于熔融石英玻璃 $\Delta_c = 8.3 \times 10^{-4}$ 。该图表示出泄漏信道光纤中基模和第二模式的限制损耗和模态折射率,其中泄漏信道光纤具有 $50\ \mu\text{m}$ 的纤芯直径,并且在 $1.05\ \mu\text{m}$ 的波长下。

[0047] 图 3 是估计的限制损耗和模态折射率对相对折射率差 Δ_c 的图表,相对于熔融石英, $n_1 = 1.444$, 孔中具有掺氟的石英,纤芯直径 $50\ \mu\text{m}$, 对应图 2 的 $1.05\ \mu\text{m}$ 的波长下,但是具有固定的 $d/\Lambda = 0.675$ 。

[0048] 图 4 是一图表,示出了 d/Λ 对图 1 中泄漏信道光纤的具有 $n = 1.444$ 的熔融石英和掺氟石英玻璃(第二包覆层材料,取代孔)的相对折射率差的估算设计上限和下限(分别根据第一和较高阶模的希望损耗水平, 0.1dB/m 和 1dB/m), 其中光纤具有 $50\ \mu\text{m}$ 的纤芯直径,并且在波长为 $1.05\ \mu\text{m}$ 下。该图表还示出了 Δn 的变化,基模和第二模式的模态折射率间的折射率差,作为 Δ_c 的函数。

[0049] 图 5 是一图表,示出了估算的基模和第二模式的弯曲损耗,和模态折射率相对于弯曲半径。该图表示出泄漏信道光纤的两个弯曲方向的模拟结果,其中所述光纤的纤芯直径为 $50\ \mu\text{m}$, $d/\Lambda = 0.673$, 波长为 $1.05\ \mu\text{m}$, 并且两种玻璃之间的相对折射率差 $\Delta_c = 8.3 \times 10^{-4}$ 。

[0050] 图 6 是一图表,示出了泄漏信道光纤的 d/Λ 和 Δn 相对于纤芯直径的设计上限和下限的估计相关性,其中所述光纤的两种玻璃之间相对折射率差 $\Delta_c = 8.3 \times 10^{-4}$, 波长为 $1.05\ \mu\text{m}$ 。

[0051] 图 7 是一照片(显微镜图像),示出了制造的泄漏信道光纤的剖视图,所述光纤的纤

芯直径为 $48.6 \mu\text{m}$, $d/\Lambda=0.8$, 并且两种玻璃之间的相对折射率差 $\Delta_c=8.3 \times 10^{-4}$ 。所述光纤的有效面积为 $\sim 1340 \mu\text{m}^2$ 。

[0052] 图 8 示出了沿两个正交方向利用图 7 所示制造的泄漏信道光纤(纤芯直径为 $48.6 \mu\text{m}$) 获得的测得模式分布(例如:模态“近场”分布)。

[0053] 图 9 是一图表,示出了在图 7 所示制备的泄漏光纤的若干弯曲半径处获得的测得弯曲损耗相对于弯曲半径,以及根据测量结果的曲线拟合。

[0054] 图 10 示出了沿两个正交方向利用制备的纤芯直径为 $110 \mu\text{m}$ 的泄漏信道光纤获得的测得模式分布(例如:模态“近场”分布)。所述光纤的有效面积为 $\sim 5940 \mu\text{m}^2$ 。

[0055] 图 11 是一图表,示出了图 10 所示纤芯直径为 $110 \mu\text{m}$ 的制备的泄漏信道光纤在若干弯曲半径处获得的测得弯曲损耗相对于弯曲半径,以及根据测量结果的曲线拟合。

[0056] 图 12 是具有非圆形形状的制备光纤的照片(显微镜图像),其中玻璃结构的第二包覆层接近旋转对称。

[0057] 图 13-a 是另一制备光纤的照片(显微镜图像),所述光纤具有非圆形形状, $152 \mu\text{m}$ 纤芯,并且包括六个高度非旋转对称的(例如,非圆形)低折射率包覆层结构和超出所述结构的包覆层区域。不过,所述结构位于旋转对称的路径上,例如,绕纤芯的环。

[0058] 图 13-b 示出沿两个正交方向利用图 13-a 的制备光纤获得的测得模式分布(模态“近场”分布)。

[0059] 图 13-c 是一图表,示出了在图 13-a 所示的制备光纤的若干弯曲半径处获得的测得弯曲损耗相对于弯曲半径的图示,以及根据测量结果的曲线拟合。

[0060] 图 14a 是另一制备光纤的照片,所述光纤具有非圆形形状, $168 \mu\text{m}$ 纤芯,包括六个非圆形/高度非旋转对称的低折射率包覆层结构和超出所述结构的包覆层区域。(不过,所述结构位于旋转对称的路径上,例如绕纤芯的环)。

[0061] 图 14-b 示出了沿两个正交方向利用图 14-a 的制备光纤获得的测得模式分布(模态“近场”分布)。

[0062] 图 15 是示出估算的限制损耗和模态折射率相对于光纤直径的图表。对应于两个正交方向的基模和第二阶模分布被叠覆,以示出相应的变化。

[0063] 图 16 是示出了估算的限制损耗和模态折射率相对于光纤直径的图表,示出了随着光纤直径的变化而变化的损耗,以及不同于图 15 所示涂覆层的涂覆层折射率。

[0064] 图 17 是示出了估算的限制损耗和模态折射率相对于涂覆层折射率的图表。

[0065] 图 18 是示出了估算的限制损耗和模态折射率相对于波长的图表。

[0066] 图 19 是一剖视图,示意性地示出了具有 3 层($N=3$)六边形排列孔的光纤,并且定义了节距 Λ , 孔直径 d , 和纤芯半径 ρ 。

[0067] 图 20 是示出了基模和第二模的模拟限制损耗相对于 d/Λ 的图表。本发明的示例实施例可以包括两层或三层($N=2, N=3$)光纤。该图表示出第二模损耗的相应二阶导数。在该示例中, $\Delta n=1.2 \times 10^{-3}$, 并且标准的波长为 $\lambda/\Lambda=10^{-2}$ 。

[0068] 图 21 是示出标准波长 λ/Λ 相对于 d/Λ 的图表,示出了气孔和全玻璃光纤的单模工作的体制。

[0069] 图 22 是一图表,示出了有效模态折射率相对于光纤直径,并且示出了基模,第二阶模,若干较高阶模,以及不连续性,在本文中被称作“抗交叉”。还示出了若干示例的计算

的模式分布。

[0070] 图 22A-22F 是更大的视图,示出了图 22 的示例计算的模态分布。

[0071] 图 23 是一图表,示出了限制损耗和模态折射率相对于光纤直径的图示,并且还示出了基模和第二阶模在抗交叉下的相对限制损耗。还示出了若干示例计算的模态分布。

[0072] 图 23A-23D 是示出图 23 的示例模态分布的更大视图。

[0073] 图 24 是示出限制损耗和第二阶模对基模的损耗比率相对于波长的图表。还示出了若干示例计算的模态分布。

[0074] 图 24A 和 24B 是示出图 24 的示例模态分布的更大视图。

[0075] 图 25 包括示出制备的泄漏模光纤性能的图表。还示出了若干示例模态分布。在 2dB/m 下测得的临界弯曲半径在插图中示出。

[0076] 图 25A 和 25B 是示出图 25 的示例模态分布的更大视图。

[0077] 图 25C 是图 25 所示插图的更大视图,示出了在 2dB/m 下测得的临界弯曲半径。

[0078] 图 26 包括示出制备的光纤在光纤放大器系统中的性能的图表。图 26 还示出了光纤和输出模的剖面。

[0079] 图 26A 是图 26 所示光纤的剖面的更大视图,而图 26B 是图 26 所示输出模的更大视图。

[0080] 图 26C 示意性地示出了大模面积光纤的一个实施例,所述光纤包括用稀土离子掺杂的芯,可用于光纤放大器或由多模式泵浦源泵送的激光器。

[0081] 图 26D 示意性地示出了基于激光的材料加工系统的一个实施例,所述系统采用大模面积光纤放大器。

[0082] 图 27 是三维图表,示出了图 26 所示光纤的测得的二维折射率分布,并且示出接近低折射率结构的折射率增加。

[0083] 图 28A-28C 示出了具有三层的制备的全玻璃 LCF 的某些特征。图 28A 示出了光纤的剖面,图 28B 示出了测得的二维折射率分布,而图 28C 示出了在 780nm-1100nm 范围内的若干不同波长下测得的若干个模态分布。

[0084] 图 29 示出了利用与图 28A 所示 LCF 相同的预制件拉制的制备光纤在若干波长下获得的模场测量结果。

[0085] 图 30 是一图表,示出了图 28B 的二维折射率分布的一部分。

[0086] 图 31 示出了制备的 LCF 的剖面,所述 LCF 具有两层包覆层结构,其中, $d/\Lambda \approx 0.6$ 。

[0087] 图 32 是示出了具有两层包覆层结构的 LCF 的基模和二阶模的限制损耗的图表。

[0088] 图 33A 是剖视图,示意性地示出了具有掺杂纤芯的大芯径 LCF 和单模光纤在接合之前的一个实施例。

[0089] 图 33B 是剖视图,示意性地示出了在接合之后的图 33A 的 LCF 和单模光纤,并且示意性地示出了单模光纤的扩大模场。

[0090] 图 33C 示意性地示出了 LCF 输出相对于包覆层结构的模态分布,示出了基本纤芯模和 LCF 传导的传播。

[0091] 图 33D 是示出制备的 LCF 的输出的照片,其中 LCF 和单模光纤如图 33B 所示接合。该照片示出了相对于包覆层结构的基本纤芯模,并且示出了 LCF 传导。

具体实施方式

[0092] 如上文所述,本发明的不同实施例包括单模光纤和大芯径光纤。

[0093] 一般,传统的单模光纤通常的纤芯直径小于 $9\text{ }\mu\text{m}$ 。如果纤芯直径进一步增大,则传统的光纤会支持更多模式。

[0094] 不过,光子晶体光纤能够以略大的纤芯直径通过以光纤的弯曲能力为代价有效减少光纤的等效数值孔径来提供单模工作。光子晶体光纤包括大阵列的气孔通常在包覆层中以六边形排列。光子晶体光纤还可以在整个波长谱(例如, 458nm – 1550nm) 范围内用作单模光纤,如果孔尺寸足够小的话。所述光纤可被称作无尽单模光纤。例如,参见 Birks 等, Optics Letters, Vol. 22, No. 3, July 1, 1997, pp961–963。

[0095] 在泄漏信道光纤(LCF)中,光膜由几个很少几个大的包覆层结构例如气孔引导。气孔可能具有允许从较高阶模泄漏光能的间距。基模可以通过泄漏较高阶模得到支持。

[0096] 泄漏模光纤,“多孔光纤”,光子晶体光纤,光子能带隙光纤等的各个方面和设计在下述转让给本发明受让人的文献中公开:(i)美国专利申请序列号 10/844,943,申请日为 2004 年 5 月 13 日,名称为“大芯径多孔光纤(LargeCoreHoley Fibers)”,公开日为 2005 年 7 月 21 日,美国专利公开号为 US2005/0157998,(ii)美国专利申请序列号 11/134,856,申请日为 2005 年 5 月 30 日,名称为“在具有大泄漏信道的光纤和棒中的单模传播(Single Mode Propagation in Fibers and Rods with Large Leakage Channels)”,公开日为 2006 年 11 月 23 日,美国专利公开号为 US2006/0263024,和(iii)美国专利申请序列号 11/323,177,申请日为 2005 年 12 月 30 日,名称为“光子能带隙光纤(PhotonicBandgapFibers)”,公开日为 2006 年 8 月 31 日,美国专利公开号为 US2006/0193583,现在的美国专利号为 7,209,619。美国专利申请号 10/844,943 ;11/134,856 ;和 11/323,177 (及其相应的公开文本)的公开内容以其全文形式在此被结合入本文引用。

[0097] 光子晶体光纤和泄漏信道光纤的设计可以在玻璃基材上使用气孔,并且能够从空气和玻璃之间的高折射率反差中获益。该折射率差被表征为相对折射率差 $\Delta_c = (n_1 - n_2) / n_1$, 其中 n_1 是背景包覆层材料(第一包覆层材料)的折射率,而 n_2 是孔中材料(第二包覆层材料)的折射率。孔和光纤其余部分(其它包覆层材料)之间的大折射率差提供了单模工作的高模限制和良好的弯曲损耗性能(低弯曲损耗)。较大相对折射率反差 Δ_c 还提供了足够的模式过滤。

[0098] 不过,为了闭合气孔以防长期环境暴露,对光纤两端处的一小部分进行加热,以闭合气孔。所制备的端面通常由于沿光纤的不均匀闭合而使输出模斑变形。另外,气孔的大小由孔的加压,拉制温度,预制件进料速度和光纤拉制过程中的拉制速度的组合来控制。该工艺可以限制可重复性,特别是对于大芯径光子晶体光纤,其中具有高表面张力的小气孔的尺寸对拉制条件非常敏感。

[0099] 本发明的实施例一般提供了泄漏信道光纤,光子晶体光纤,无尽单模光子晶体光纤,和其它设计的改进。所述改进可以包括制造优势。

[0100] 在本文所披露的不同实施例中,包覆层包括包覆层结构,所述包覆层结构包括设置在第一包覆层材料中的至少一种第二材料(在某些实施例中,将一种以上材料用于包覆层结构。例如,在某些实施例中,使用了 4 种掺氟石英结构和 2 种掺硼石英应力棒)。第一材料具有折射率 n_1 ,而第二材料具有折射率 n_2 。已知光纤的某些特性受第一和第二材料的

相对折射率的影响。

[0101] 例如,一般已知弯曲损耗性能会随着低相对折射率差而恶化。该趋势通过实验和模拟得到证实。不过,令人吃惊的是,还发现利用低相对折射率差可以获得模式过滤的显著改进,同时保持适当的弯曲损耗性能。

[0102] 所述低折射率反差光纤可以包括设置在玻璃材料中的玻璃包层结构。玻璃包层结构有利于避免或至少减少与在包层中制造气孔相关的难度。另外,具有圆角的六边形形状截面易于形成在玻璃包覆层材料中设置玻璃包层结构的光纤。所述具有六边形形状截面的光纤提供了双包层光纤中模混合泵浦光传播的优点,它被设置成至少部分通过六边形侧壁引导泵浦光。

[0103] 由具有减小折射率反差的制备光纤获得的模拟结果和测量结果表明,对于很多应用,通过足够的模式过滤和足够的弯曲损耗性能可以获得单模工作。光纤的不同实施例一般被设置成提供较高阶模的损耗,以便在光纤输出发射的能量对应低阶模式。例如,光纤可以产生一输出,它的模态分布是对基模的非常好的近似。

[0104] 如本文所用,单模和多模光纤的定义与用于传统无孔光纤的定义一致。对于传统的光纤,单模和多模光纤一般以 V 值定义,它等于阶梯折射率光纤的 π (数值孔径)(纤芯直径)/波长。对于非阶梯折射率光纤,数值孔径和纤芯直径可以用阶梯折射率光纤的等效值进行计算[例如,参见 Martinez, F., Husey, C. D., "(E) ESIdeterminationfrommode-field diameterandrefractiveindexprofilemeasurements onsingle-mode fibres" IEEE Proceedings V135, pp. 202-210, (1988)]。对于满足关系式 $V < 2.4$ 的光纤,基模的功率显著大于下一更高阶模的光功率。另外,对于 $V > 2.4$ 的光纤,至少基模之上的下一个模与基模相比具有显著的功率。因此,单模和多模传统光纤分别专门通过关系式 $V < 2.4$ 和 $V > 2.4$ 定义。 $V = 2.4$ 是除最低阶模外切断任何模式的传播。

[0105] 在有孔光纤中,数值孔径可以通过纤芯和包层的折射率差找到。不过,是阶梯折射率光纤的等效值的纤芯直径难以计算。不同的参考文献[例如,参见(1) Knight et al, "Properties of photonic crystal fiber and the effective index model" J. Opt. Soc. Am. A Vol. 15, pp. 748-752, (1998), 和(2) Mortensen et al "Modal cutoff and the V parameter in photonic crystal fibers" Opt. Lett. V. 28, pp. 1879-1881, (2003)] 报导,如果使纤芯直径等于节距或孔间距离 Λ , 则除了单模之外切断任何模式的传播的 V 是 2.5 (例如,参见 Knight 等) 和 π (例如,参见 Mortensen 等)。对于本文所述的不同实施例,无论 V 截止值是 2.405, 2.5 或 π 都不是决定性的。本文所述有孔光纤的不同实施例比支持单光膜传播的传统光纤可能的纤芯半径具有更大的纤芯半径。因此,我们将在该技术领域中采用最近的研究成果,其中多模光纤定义为其中 $V > \pi$, 并且使纤芯直径等于光纤的节距或平均节距。相反地,单模光纤在本文中被定义为其中 $V < \pi$ 的光纤。

[0106] 多孔光纤可被设计成引入特定模式的损耗。例如,可以选择孔的大小、桥接和孔的数量,以便在 $V > \pi$ 的多模光纤中引起较高阶模传播的损耗。随着孔的数量的减少,较高阶模式中的光线可能不被限制在纤芯,并且可能从光纤中漏出。引入具有 $V > \pi$ 的多模光纤的所述损耗类似于传统的无孔多模光纤,所述无孔多模光纤具有 V 值大于 π , 包括例如通过弯曲光纤以引入较高阶模传播中的损耗而提供的模过滤。(滤模器披露于,例如,美国专利号 5,818,630 中,它于 1998 年 10 月 6 日授权予 Fermann 等人,名称为"单模放大器

和基于多模光纤的压缩机 (Single-mode Amplifier and Compressors Based on Multi-mode Fibers)”。可以施加足够的弯曲,以便引起高于基模的每种模式的损耗,使得基模是通过弯曲的多模光纤传播的唯一模式。类似地,具有 V 值大于约 π 的多模多孔光纤具有这样一种设计,它可对较高阶模引入损耗,使得这些较高阶模的传播衰减。光纤不需要弯曲以提供模式过滤。

[0107] 图 1-a 和 1-b 示出了泄漏信道光纤。示例的光纤 100 包括由包层结构 102 (例如 6 个孔) 环绕的纤芯 101。所述结构的直径为 d , 并且中心至中心的间距 (又被称作节距) 为 Λ 。纤芯的直径被定义为最近的孔至孔间距 2ρ 。光纤直径为 $2\rho_0$ 。在该示例中,第一包层区域 103 形成超出低折射率包层结构 102, 并且添加了涂覆层 104。选择标准的孔直径 d/Λ , 使得二阶模的泄漏损耗明显大于基模的泄漏损耗。这样,通过利用该内置模式过滤,能够在比传统光纤所可能的更大纤芯直径下提供有效的单模工作。

[0108] 图 1b 和 1c 示意性地示出了圆孔作为包层结构。类似地,示出了示例的圆形光纤的光纤直径 $2\rho_0$ 。通过下述制备光纤的示例可以看到,包层结构可以是非圆形的,并且光纤的形状可以包括至少非圆形部分。例如,某些结构或包层形状可近似于六边形,八边形,或可以是旋转不对称的,具有线性和/或弯曲部分。在某些实施例中,包层形状可以是不规则的,并且没有明确限定的标准形状。

[0109] 多边形直径的一种可能定义是任何一对顶点之间的最大距离,并且对应最长的多边形对角线。另外,对于结构尺寸 d , 除非另有说明, $d/2$ 一般被认为是从结构的中心沿连接两个最接近相邻物的中心的线到一侧的距离。结构的中心对于非圆形或非对称结构可被计算为“质量中心”或“质心”。

[0110] 举例来说,光纤直径的数值一般涉及如图 1-b 所示的第一包层 103 的外边缘,它在某些实施例中也被用作泵浦传导件 (pumpguide)。对于圆形光纤的示例,直径是 $2\rho_0$ 。该直径是沿穿过芯 101 中心的线的第一包层 103 的外边缘的最大尺寸。

[0111] 在至少一个实施例中,至少一个包层结构 102 由第二材料玻璃制备,所述第二材料玻璃的折射率低于纤芯 101 或其它包层材料 (例如,第一包层材料) 103 的折射率。某些实施例包括“全玻璃”设计,其中,包层结构 102 和其中设有包层结构的材料都包括玻璃。

[0112] 例如,在掺氟石英 (对于使用包层结构 102 而非全气孔的情况,掺氟石英或其它适用的材料) 和其中设有包层结构的另一包层材料之间形成了非常小的相对折射率差,例如 Δ_c 接近 8.3×10^{-4} 。包层材料 102 (第二包层) 一般的折射率略小于光纤 101 的包层材料 103 (第一包层) 的折射率。令人吃惊的是,光子晶体光纤和泄漏信道光纤的低损耗单模工作可以在两种包层材料之间的相对折射率差明显低于 7×10^{-3} 的情况发生。在某些实施例中,对于大芯径光纤,相对折射率差 Δ_c 低至 2×10^{-4} 。相对折射率也可能较低。在某些实施例中, Δ_c 可能小于约 1×10^{-3} , 或小于约 4.5×10^{-3} 。在本文所述的光纤实施例中,相对折射率在 $1.05 \mu\text{m}$ 的标称波长下确定。数值模拟一般根据 $1.05 \mu\text{m}$ 的设计波长进行,不过,波长相关性被量化并被发现是弱的。

[0113] 另外,全玻璃光子晶体光纤、无尽单模光纤和泄漏信道光纤与传统光纤相比能提供易用性,并且易于制造。如上所述,所述“全玻璃”光纤的优点包括足够低的弯曲损耗,改进的已制造产品的可重复性和性能 (因为缺少气孔),以及光纤截面的形状可方便采用六边形形状,例如具有圆角的形式。

[0114] 一般,非常小的相对折射率可以提供单模工作的足够模式过滤,同时还能提供合理的弯曲损耗性能。尽管更大的 Δc 意味着良好的模式过滤和弯曲性能,足够小的相对折射率差提供单模和对弯曲损耗的控制。另外,如上所述,第一背景包层材料和孔中第二包层材料之间的降低或最小的有用折射率差显著改善了可加工性和性能。下文讨论了通过制备具有掺氟石英的若干泄漏信道光纤获得的结果,其中掺氟石英的相对折射率差为 $\Delta_c \sim 8.3 \times 10^{-4}$,以取代在先设计中所用的气孔。确定具有制备的泄漏信道光纤的实施例在很多应用中提供足够的弯曲损耗性能。

[0115] 如上文所述,已知弯曲损耗性能会随着低相对折射率差而恶化,并且通过申请人的实验和模拟得到了证实。不过,申请人发现了具有低相对折射率差的模式过滤的显著改善,并且还发现弯曲损耗性能是适当的。例如,该“全玻璃”设计与其中包层结构包括气孔的等同泄漏信道光纤相比提供了改进的模式过滤。

[0116] 在某些实施例中,由于两种包层材料之间的折射率差小很多,可以使用广泛可获得的高纯度熔融石英玻璃作为第一包层玻璃 103,而另一种用氟或 / 和硼掺杂的高纯度石英玻璃可用作第二包层玻璃 102。如果氟和硼的掺杂水平低,该两种包层材料会具有良好的机械、化学、物理和热兼容性。商用的掺氟石英可用作孔 102 的材料,而高纯度石英玻璃用于第一包层 103。其它材料 and 设计也是可行的。

[0117] 图 1c 是“全玻璃”设计的另一示例:双包层、偏振保持、镱-掺杂的大芯径光纤(如上文所述,当所述双包层结构包括在具有非圆形,例如六边形截面的光纤中时,可以增强泵浦混合)。纤芯 101 内部的镱-掺杂区域 105 的直径为 $2d_0$,而折射率密切匹配周围的玻璃。两个应力元 106 具有显著不同于周围玻璃的热膨胀系数和不同于其它低折射率结构 102 的折射率。应力元 106 还可以具有不同于其它低折射率结构 102 的尺寸和大小。应力元 106 可以由硼掺杂的石英玻璃制成。在该示例中,玻璃 107 是低折射率玻璃,以便提供泵浦包层,并且可以由氟和 / 或硼掺杂的石英玻璃制成。

[0118] 制造图 1 所示的光纤一般通过制造泄漏光纤设计的方法进行。例如,首先将氟掺杂的石英棒插入要拉制成茎线(cane)的石英管,使茎线具有希望的直径和掺氟石英对石英玻璃的比率。所述茎线连同石英茎线随后以希望的构造层叠成六边形层叠。所述层叠随后被插入要拉制成光纤的石英管中。有时在石英管内使用真空,结合低拉制温度,以产生非圆形光纤(例如六边形光纤)。镱-掺杂的石英棒或 / 和应力棒有时用于层叠中,以制成镱-掺杂的光纤或 / 和偏振保持光纤。一般,低相对折射率“全玻璃”结构可以简化泄漏光纤的总体制造,例如,如上文所述。

[0119] 图 1-d 示出了可以采用的其它包层结构。如图所示,包层结构的截面并不局限于圆形。图 1-d 示出了某些其它可能的形状 120-127,这些形状也可以被使用。因此,包层结构的设置,例如,包层结构的形状,尺寸,材料,折射率等可以改变。改变不限于包层结构的周边,还可以包括其它的内部结构和设计。例如,图 1-d 中的截面 128,130 和 132 示出了一个或多个内含体 129,131 和 133,它的折射率不同于包埋所述内含体的材料的折射率。这些内部结构也可以变化,例如,在形状、大小、排列、材料、折射率等方面变化。其它设计也是可行的。

[0120] 图 2-18 示出了不同的模拟结果,表征根据测量结果和其它信息的若干制备的光纤。例如,讨论了具有不同几何形状,纤芯尺寸,直径和涂覆层的光纤。假设包层区域 103

是非限定的(例如非限定的直径),并且没有涂覆层 104,可以获得对应图 2-6 所示图表的计算结果。某些计算结果表明有限直径和涂覆层折射率变化的影响。另外,一般根据 $1.05\ \mu\text{m}$ 的设计波长进行模拟,尽管波长相关性被量化并且发现是弱的。熔融的石英玻璃被假设具有的折射率为 $n=1.444$,接近设计波长的通常值,所述设计波长在实践中可以根据正常的制造公差而有稍许变化。还包括了示出制备光纤和测得模态分布的例子。

[0121] 图 2 示出了在 $1.05\ \mu\text{m}$ 的波长下纤芯直径为 $50\ \mu\text{m}$ 的泄漏信道光纤的基模和二阶模的限制损耗和模态折射率。假设石英玻璃的折射率为 1.444 。商用具有比石英更低相对折射率差 $\Delta_c=8.3\times 10^{-4}$ 的掺氟石英用于 6 包层结构。曲线 201,202,203 和 204 分别是基模的限制损耗,二阶模的限制损耗,基模的模式折射率和二阶模的模式折射率。绘出了不同标准孔直径 d/Λ 的限制损耗 201 和 202。可以看到,限制损耗朝向小包层结构直径增大,并且二阶模的限制损耗(曲线 202)是基模限制损耗(曲线 201)的大约 27 倍,此时限制损耗以 dB/m 表示,令人吃惊地显示小相对折射率差 $\Delta_c=8.3\times 10^{-4}$ 不会危及内置模式过滤的水平。使用 0.1dB/m 的最大基模损耗来找到标准孔直径 d/Λ 的下限 205,并且用 1dB/m 的最小二阶模损耗来找到标准孔直径 d/Λ 的上限 206。

[0122] 图 3 示出了对于在 $1.05\ \mu\text{m}$ 的波长下纤芯直径为 $50\ \mu\text{m}$ 和 $d/\Lambda=0.675$ 的泄漏信道光纤,限制损耗和模态折射率对于折射率为 $n=1.444$ 的熔融石英和孔中(包层结构)玻璃的折射率差的相关性。曲线 301,302,303 和 304 分别是基模的限制损耗,二阶模的限制损耗,基模的模式折射率和二阶模的模式折射率。限制损耗随着折射率反差的降低而增大。

[0123] 图 4 示出了对于在 $1.05\ \mu\text{m}$ 的波长下纤芯直径为 $50\ \mu\text{m}$ 的泄漏信道光纤, d/Λ 的设计上限和下限对折射率为 $n=1.444$ 的熔融石英和孔(包层结构)中玻璃的折射率差的相关性。使用 0.1dB/m 的最大基模损耗来找到标准孔直径 d/Λ 的下限,并且用 1dB/m 的最小二阶模损耗来找到标准孔直径 d/Λ 的上限。曲线 401,402 和 403 分别是:标准孔直径 d/Λ 的下限,标准孔直径 d/Λ 的上限,以及基模和二阶模的模式折射率之间的折射率差 Δn 。除了设计的设计上限和下限的孔直径朝向更小的相对折射率差而增大外,朝向小相对折射率差的设计间距也变小,但是对于本示例,设计间距在相对折射率差低至 $\Delta_c=3.5\times 10^{-4}$ 时仍可获得。

[0124] 图 5 示出了对于纤芯直径为 $50\ \mu\text{m}$, $d/\Lambda=0.673$,波长为 $1.05\ \mu\text{m}$,相对折射率差 $\Delta_c=8.3\times 10^{-4}$ 的泄漏信道光纤,两种弯曲方向的基模和二阶模的弯曲损耗。当弯曲平面与两个包层结构的中心相交时呈现 AA 弯曲方向 501。当弯曲平面不与包层结构相交时呈现 BB 弯曲方向 502。曲线 503,504,505,506,507 和 508 分别是具有 AA 弯曲方向的基模损耗,具有 BB 弯曲方向的基模损耗,具有 AA 弯曲方向二阶模损耗,具有 BB 弯曲方向二阶模损耗,基模的模式折射率和二阶模的模式折射率。从基模和二阶模损耗曲线 503,504,505 和 506 可以看到,损耗在临界弯曲半径以上变化缓慢,而在临界弯曲半径以下增大的非常快。与基模相比,二阶模具有更大的临界弯曲半径。当卷绕半径在低于二阶模的临界弯曲半径和高于基模的临界弯曲半径工作时可以获得极高的二阶模损耗,同时具有低的基模损耗。

[0125] 图 6 示出了对于在 $1.05\ \mu\text{m}$ 的波长下具有相对折射率差 $\Delta_c=8.3\times 10^{-4}$ 的泄漏信道光纤, d/Λ 的设计上限和下限对纤芯直径的相关性。曲线 601,602 和 603 是标准包层结构直径 d/Λ 的下限,标准包层结构直径 d/Λ 的上限,以及基模和二阶模的模式折射率之间的折射率差 Δn 。如同图 4 的示例,使用 0.1dB/m 的最大基模损耗来找到标准孔直径 d/Λ

的下限,并且用 1dB/m 的最小二阶模损耗来找到标准孔直径 d/Λ 的上限。可以看到,对于大芯径直径,设计间距的 d/Λ 的下限和上限倾向于小包层结构直径。大包层结构用于小纤芯直径。由于在该结构中相对包层结构直径一般只能达到 1in.,设计间距在纤芯直径低于约 $24\mu\text{m}$ 时消失。

[0126] 图 6 中的设计极限针对直型光纤。由于在实践中采用卷绕软化,图 6 中的设计间距通常偏向稍大的 d/Λ ,以便光纤会提供更好的弯曲性能。另外,尽管具有“极限”,例如对于本文所讨论的给定性能,某些实施例可以超出上述(极限)限制,例如当需要不同的性能或出于其它原因时。

[0127] 图 7 是一照片(显微镜图像),示出了制备的泄漏信道光纤的截面,其中纤芯直径为 $48.6\mu\text{m}$, $d/\Lambda=0.8$ 。光纤的有效面积为 $\sim 1340\mu\text{m}^2$ 。包层结构包括氟掺杂的石英,并且环绕包层结构的材料包括不含氟的石英玻璃。玻璃的这种组合产生的相对折射率差为 $\Delta_c=8.3\times 10^{-4}$ 。通过层叠石英棒制成预制件(具有 6 个棒,通过将石英管压扁在氟掺杂的石英棒上制成),以便使相对包层结构直径 $d/\Lambda=0.8$,并随后拉制成较小的茎线。两种光纤被拉制成直径为 $244\mu\text{m}$ 和 $552\mu\text{m}$,以便分别得到纤芯直径为 $48.6\mu\text{m}$,有效面积为 $\sim 1340\mu\text{m}^2$,和纤芯直径为 $110\mu\text{m}$,有效面积为 $\sim 5940\mu\text{m}^2$ 。图 7 示出了纤芯直径为 $48.6\mu\text{m}$ 的制备泄漏信道光纤 700 的截面,其中,纤芯 701 基本上由 6 个低折射率掺氟石英区域 702 环绕,而 703 是低折射率包层结构之外的包层区域。

[0128] 图 8 示出了来自光纤 700 输出的测得的近场模斑 800。还分别以 801 和 802 示出了沿水平和垂直方向的模态分布。

[0129] 图 9 示出了通过测量光纤 700 的输出,同时将光纤 700 卷绕成具有不同直径的卷所获得的弯曲损耗 901。曲线 900 是测得数据 901 的拟合曲线。例如,光纤 700 可以卷绕成 30cm 直径的卷,而不会引起明显的损耗。

[0130] 图 10 示出了从直径 $110\mu\text{m}$ 的光纤的输出测得的近场模斑。在 1001 和 1002 分别示出了沿垂直和水平轴线的模态分布。在这里,大约 7 米的光纤被卷绕成单个约 2 米卷绕直径以供测量。

[0131] 图 11 示出了图 10 所示光纤的测得弯曲损耗 1100,具有对测得数据 1100 的拟合曲线 1101。对于该示例,最小弯曲半径为大约 60cm。

[0132] 获得了对应非圆形形状、不同直径、具有涂覆层和其它变化形式的光纤的其它模拟结果和测量结果。

[0133] 图 12 示出了另一制备的光纤 1200,它具有非圆形的近似六边形形状。图 12 中所示的光纤 1200 的截面具有六个侧边,在它们之间具有圆角。该六边形几何形状有利于在双包层光纤中的泵浦模式混合。纤芯 1201 和低折射率结构 1202 同样是非圆形的,并且近似六边形。包层区域 1203 延伸超过低折射率包层结构 1202。

[0134] 图 12 所示具有六边形外形但具有圆角的光纤 1200 与图 7 所示圆形几何形状的光纤 700 形成对比。如上文所述,光纤 1200 的这种具有圆角的六边形形状有利于在双包层结构中的泵浦模式混合,其中光纤的外形形成泵浦传导件。在示例的预制件制备工艺中,形成六边形层叠,使得掺氟棒和石英棒呈它们希望的构造。该层叠在插入更大的石英管之前沿其长度在炉子的高温下略微熔融。在光纤拉制过程中,少量的真空被用于外管内部。该真空足以帮助光纤和结构的六边形形状的形成。在某些实施例中,可以在 2000°C 的拉制温度

下使用 -0.5inHg 至 -3inHg 的真空。如果适当调整控制温度,也可以预见更低和更高的真空能得到类似结果。

[0135] 图 13a 对应端视图,示出了另一光纤 1300,它具有非圆形形状,具有明显的边界变化,以及非旋转对称的(例如,非圆形)低折射率结构。不过,该结构位于旋转对称的路径上,例如环,围绕纤芯。光纤 1300 具有六个侧边,其上具有小的凹进,并且其间具有圆角。制备的光纤 1300 包括纤芯 1301,其直径为 $152\text{ }\mu\text{m}$,定义为边至边的距离。光纤还具有六个低折射率结构 1302,它们不是圆形的,并且包层区域 1303 在低折射率结构之外。该形状可用于增大泵浦混合。如上文所述,在具有圆形截面的光纤中,避免光纤掺杂中心的斜射光可以在光纤内传播。由圆形截面的变形可以增加通过光纤中心的射线数,其中光纤中心用增益媒介掺杂,从而提高泵浦效率。

[0136] 图 13b 示出了光纤 1300 的测得近场模态分布 1310,分别具有沿垂直和水平方向的模态分布 1311 和 1312。纤芯直径为 $152\text{ }\mu\text{m}$ 。模态具有测得的 M^2 为 1.4。不足的模态过滤可能造成降低的束流质量。大约 7 米的光纤被卷绕成单个约 2 米的卷绕直径,以供测量,如图 10 所示。

[0137] 图 13-c 示出了弯曲损耗。曲线 1320 是在光纤 1300 上测得的弯曲损耗。光纤可以弯曲成弯曲半径为 0.5m ,而没有明显的弯曲损耗的不利结果。

[0138] 图 14a 对应端视图,示出了另一制备的光纤。制备光纤 1400 的纤芯 1401 的直径为 $168\text{ }\mu\text{m}$ 。有六个低折射率结构 1402,以及低折射率结构之外的区域 1403。该光纤 1400 还具有非圆形形状,具有明显的边界变化,和非旋转对称的(例如,非圆形)低折射率结构。不过,该结构位于旋转对称的路径上,例如环,围绕纤芯。光纤 1400 具有六个侧边,其上具有小的凹进处,并且其间具有圆角。该形状还有利于增强泵浦混合。

[0139] 图 14b 示出了由光纤 1400 测得的近场模斑 1410;1411 和 1412 分别是沿垂直和水平方向的模态分布。有效的模态面积为大约 $13,900\text{mm}^2$ 。该模态具有测得的 M^2 值为 1.12,接近理论极限。使用了长度大约为 0.9m 的直型光纤。

[0140] 图 15 是一图表,示出了估算的限制损耗和模态折射率对光纤直径。对应两个正交方向的基模和二阶模分布被叠加,以显示相应的变化。该图表示出了计算的基模损耗 1500,基模折射率 1501,二阶模损耗 1502 和二阶模折射率 1503。曲线 1504,1505,1506 和 1507 分别是沿水平和垂直方向的实线和虚线的基模分布,分别对应 $179\text{ }\mu\text{m}$, $207.5\text{ }\mu\text{m}$, $251.5\text{ }\mu\text{m}$, 和 $259\text{ }\mu\text{m}$ 的光纤直径。曲线 1508,1509 和 1510 分别是沿水平和垂直方向的实线和虚线的二阶模分布,分别对应 $196.5\text{ }\mu\text{m}$, $210\text{ }\mu\text{m}$, 和 $247.5\text{ }\mu\text{m}$ 的光纤直径。假设涂覆层折射率为 1.54。在非圆形光纤中,在 1500 和 1502 上的峰值预计变宽。

[0141] 计算结果表明,基模和二阶模损耗随着光纤直径而变化。在某些直径,模态更多限制于光纤的中心,如 1505 和 1509 所示,以提供低损耗。而在某些其它直径,模态较少限制于中心,例如基模的 1504,1506,1507,以具有较高的损耗。

[0142] 由于直径的选择可能影响损耗,通过具有或者选定或优化(或大致如此优化)直径工作以便提供二阶模的较高损耗和基模的较低损耗可能有利。

[0143] 图 16 是一图表,进一步示出了估算的限制损耗和模态折射率对光纤直径的图示,示出了随光纤直径变化而变化的损耗。图 16 示出了计算的基模损耗 1600,基模折射率 1601,二阶模损耗 1602 和二阶模折射率 1603。当光纤直径变化时,基模和二阶模的损耗发

生变化。为了进行分析,假设复杂的涂覆层折射率为 $n_0=1.37+j*10^{-8}$ 。

[0144] 图 17 是示出估算的限制损耗和模态折射率对涂覆层折射率的图表。图 17 示出了计算的基模损耗 1700,基模折射率 1701,二阶模损耗 1702,和二阶模折射率 1703 相对于涂覆层折射率 n_0 。同样,使用了具有虚部 10^{-8} 的损耗涂覆层。假设光纤直径为 $247\mu\text{m}$ 。线 1704 对应涂覆层,所述涂覆层匹配第二包层材料,所述第二包层材料环绕包层结构并且包括折射率为 1.444 的玻璃。线 1705 和 1706 分别是当涂覆层折射率匹配第二包层材料(所述第二包层材料环绕包层结构并包括玻璃)时,基模和二阶模损耗的水平。可以看到,二阶模和基模之间的损耗差异在涂覆层折射率不同于环绕包层结构的玻璃的折射率时要大的多。

[0145] 图 18 是示出估算的限制损耗和模态折射率对波长的图表。不同波长的计算的基模损耗 1800,基模折射率 1801,二阶模损耗 1802,和二阶模折射率 1803 表明了弱的波长相关性,这会允许实现实际的光纤。在这里 $n_0=1.54$,并且光纤直径为 247mm 。

[0146] 除了泄漏信道光纤之外,本发明的某些实施例可以包括光子晶体光纤。光子晶体光纤披露于 Birksetal, OpticsLetters, Vol. 22. No. 3, July1, 1997, pp961-963。

[0147] 光子晶体光纤的一种应用是用于设计无尽单模光纤,其中,在很大的波长范围内实现单模工作(例如,波长范围大于 500nm 或大于 1000nm ,如波长范围为 458nm - 1550nm)。这通过将相对孔径限定为低于 0.406 来实现。在该体制中,实验证明,在更短的波长下在玻璃上有更多的光线(与孔形成对照),并因此有效包层折射率更高。当波长增大时,光纤的有效 NA 相应降低。所述光子晶体光纤的该色散可有利地用于将光纤的单模工作延伸至更小的波长。

[0148] 具体地讲,该色散与传统光纤中的趋势相反,所述传统光纤的趋势导致传统单模光纤在较短波长下变成多模。例如,V 值与波长呈反比。因此,随着波长降低,V 值变大并且超过 2.405,其中传统光纤对于这些较小的波长为多模。

[0149] 在具有小孔的光子晶体光纤中,有效包层折射率在较小波长下增大,导致更多光线集中在背景玻璃上(而不是包层结构)。该色散补偿了 V 值对波长的反向相关性,否则会限制单模工作的范围在较大波长。在这些光子晶体光纤中包层折射率的所述色散性质从而使光纤的单模工作延伸至较短的波长,并且能够进行无尽单模工作,这在传统单模光纤中是不可能的。

[0150] 除了提供单模工作之外,光子晶体光纤还可以形成大芯径单模光纤。这是因为光子晶体光纤通过控制包层中的气孔直径能够获得非常低的光纤数值孔径(NA)。包层是合成的,其中,有效折射率由空气填充率和波长确定。因此,通过设计气孔,例如,大小和密度,可以在有效折射率和数值孔径上进行控制。

[0151] 光子晶体光纤(PCF)和泄漏信道光纤(LCF)具有孔数作为区别因素。PCF 一般具有大量的孔,并且层数(例如环)一般为 $N \geq 3$ 。PCF 还可以具有比 LCF 更小的孔。

[0152] 图 19 示出了 $N=3$ 的光纤 1900 的示例,其中光纤的纤芯 1901 由排列成六边形图案的一系列气孔 1902 环绕,包括三个环或层。还示出了孔径 d,中心到中心的间距,又被称作节距 Λ ,和纤芯直径 2ρ 。

[0153] 本发明的某些实施例可以包括基本上“全玻璃”(例如,设置在玻璃基质材料中的玻璃包层结构),呈无尽单模光纤和/或大芯径光纤结构,其中玻璃结构 1902(而不是气孔)具有非常低的相对折射率差,这是对于其中设由玻璃包层结构的材料或与光纤的其余部分

比较而言。正如下文所讨论的,低至 8.3×10^{-4} ,有可能更低的多的相对折射率差可用于实现所述光纤。这里提供了用于包括全玻璃无尽单模光纤和大芯径光子晶体光纤的不同实施例的设计指南。

[0154] 为了分析单模体制的工作,可以检查二阶模临界值。在传统的光纤中,二阶模临界值可以通过定义明确的 V 值,例如对于阶梯折射率光纤 $V=2.405$,容易地获得。物理上讲,这是一个转变点,二阶模的全内部反射条件正好在这里停止被满足。在具有合成包层的光子晶体光纤中,该点不易被界定。

[0155] 在先的研究已经分析了气孔光子晶体光纤的模式临界值。最初的分析通过研究光纤的有效模式面积的过渡进行,以寻找二阶模不再明显局限于纤芯的转变点 (Mortensen OpticsExpress, vol. 10, pp341-348, 2002)。Kuhlme yetal (Kuhlme yetal, OpticsExpress, vol. 10, pp. 1285-1290, 2002) 业已发现,二阶模的限制损耗由清楚的转变点。该转变点可以通过寻找二阶模限制损耗的二阶导数的峰值而精确定位。

[0156] 图 20 示出了在 $\lambda/\Lambda=10^{-2}$ 下具有相对折射率差 $\Delta_c=8.3 \times 10^{-4}$ 的光纤中定位二阶模临界值的这一过程。曲线 2001, 2002, 2003, 2004, 2005, 和 2006 分别是 2 层光纤中二阶模的限制损耗, 2 层光纤中基模的限制损耗, 2 层光纤中二阶模损耗的二阶导数, 3 层光纤中二阶模的限制损耗, 3 层光纤中基模的限制损耗, 和 3 层光纤中二阶模损耗的二阶导数。曲线 2001 和 2004 示出了从对 d/Λ 具有强相关性的局部边界域到弱的非局部模式的二阶模损耗的转变点。该点由 $N=2$ 的曲线 2003 和 $N=3$ 的曲线 2006 的峰值定位。所用的层数不影响转变点的位置,但是它确实使二阶模损耗的二阶导数中的峰值变窄。在具有更多层的光纤中绝对损耗要小的多。相反,随着模式变得更少局部化,它对诸如微弯曲和宏弯曲的扰动更为敏感,这会迅速减弱实际光纤中的模式。

[0157] Kuhlme y 的结果 (Kuhlme yetal, OpticsExpress, vol. 10, pp. 1285-1290, 2002) 在图 21 的曲线 2101 示出。二阶模会靠曲线 2101 左侧有效截止。气孔光子晶体光纤的无尽单模工作对于 $d/\Lambda < 0.406$ 是真实的。曲线 2100 是相对折射率差为 $\Delta_c=8.3 \times 10^{-4}$ 的二阶模截止。图 21 的上部表示小纤芯直径,其中 λ/Λ 是大的,而图 21 的下部表示大芯径,其中 λ/Λ 是小的。从图 21 可以看到,对于 $d/\Lambda < 0.425$, $\Delta_c=8.3 \times 10^{-4}$ 的情况,可以实现无尽单模工作。在大芯径体制中,见图 21 的下部,曲线 2100 和 2101 是接近的,而曲线 2100 在图 21 的上部小芯径体制中更多地向更大的 d/Λ 移动。在某些小纤芯直径,即 $\lambda/\Lambda > 9.17 \times 10^{-2}$, 对于所有 d/Λ 可以实现单模工作。

[0158] 所计算的二阶模截止值对应相对折射率差 $\Delta_c=8.3 \times 10^{-4}$ 。相对折射率差大于 $\Delta_c=8.3 \times 10^{-4}$ 的二阶模截止值会落在曲线 2100 和 2101 之间,而相对折射率差小于 $\Delta_c=8.3 \times 10^{-4}$ 的二阶模截止值会落在曲线 2100 之下。

[0159] 在光子晶体光纤中可以实现单模工作,其中所述光纤具有包括很多周期性包层结构的大包层,不过代价是由于较小的 d/Λ 而使弯曲性能变差。另一方面,泄漏信道光纤只需要很少的包层结构,例如 1-3 层孔,可以提供更好的弯曲性能,具有足够水平的模式过滤。

[0160] 另外,可以通过在六边形结构中缺少更多的孔,例如 7 个孔,而不是如图 19 所示仅缺少一个孔,来形成纤芯。例如,参见 Limpert etal, OpticsExpress, vol. 14, pp. 2715-2720, 2006 和 Schreiber etal, OpticsExpress, vol. 13, pp. 7622-7630, 2005)。在某些实施例中

$d/\Lambda < 0.25$ 周围的小孔尺寸被用于设计。具有低折射反差的类似全玻璃设计也是可行的,但是可能涉及比用于气孔情况稍大的孔。

[0161] 当纤芯直径变时光纤的弯曲能力变差。在某些实施例中,在 $2\rho > 100\ \mu\text{m}$, 使用大弯曲直径,例如 $> 1\text{m}$ 。用这些光纤制造的放大器被设计主要适用小于 1 米的短长度的直型光纤,并且具有高度掺杂的纤芯。这允许线性或接近线性的构造使得尺寸实用。在某些情况,光纤可以采用直径为 0.3mm –若干 mm 的短棒形式。泄漏信道光纤可被设计成通过提供足够的模式过滤在直线情况工作。这可以通过减小包层结构直径进行,导致较低值的比率 d/Λ 。

[0162] 在上述的示例中,尽管石英和氟掺杂的玻璃分别被用作第一包层材料和第二包层材料,可以通过用掺杂剂或掺杂剂的组合,如氟和硼,来掺杂石英玻璃,获得高达 5×10^{-3} 的相对折射率差。

[0163] 在某些实施例中,石英可用作第一和第二材料,但是只有一种材料可能被掺杂,例如,包括掺杂的石英。在不同的实施例中,例如,包层结构是掺杂的,并且它的折射率比其中设有包层结构的背景包层材料更低。

[0164] 在其它实施例中,背景材料用例如,锆,磷,锡,钛等的组合掺杂,而留下未被掺杂的结构,例如,石英。还可能对背景材料和包层结构都进行掺杂,以便产生折射率差。在其它实施例中,可以将掺杂的石英用于第一和第二材料,但是对于第一和第二材料采用不同的掺杂剂或掺杂剂水平。

[0165] 例如,锆或 / 和磷掺杂的石英玻璃可用作第一包层材料,而石英玻璃、或氟或 / 和硼掺杂的石英玻璃可以用作第二包层材料,以获得高达 3% 的相对折射率差。这些玻璃可以通过汽相淀积技术制成具备高纯度,并且物理、机械、化学和热兼容。

[0166] 还可以使用其它石英玻璃。另外,其它非-石英玻璃,如磷酸盐玻璃,碲化物玻璃,硫系玻璃,铋玻璃,氟化物玻璃等也可用于实施具有低相对折射率差的设计。在某些实施例中,具有稍低一些折射率的略微改进形式的相同玻璃可以用作第二包层材料,以获得良好的兼容性。还可以使用其它材料。

[0167] 本文所示用于实施大芯径光纤的优选实施例包括低折射率反差的包层结构。值得注意的是,具有大得多的折射率反差的结构与结构是气孔的情况一样同样可行。

[0168] 其它 LCF 特性,模拟,和实施例

[0169] 图 15–18 示出了若干示例,示出限制损耗相对于光纤直径,涂覆层折射率,以及波长。业已发现,直径的选择可能影响损耗,并且使用最佳优化(或近似如此优化)的直径工作以提供二阶模的较高损耗和基模的较低损耗可能是有利的。有限光纤直径,光纤直径的相对变化,光纤上的涂覆层,和波长也可能以不同方式影响模态分布。

[0170] 尽管有不同合适的替代材料可用于涂覆光纤,常用的涂覆层是高折射率聚合物或低折射率涂覆层。高折射率聚合物涂覆层通常用于标准光纤,而低折射率涂覆层用于形成双包层光纤,所述双包层光纤支持多模泵浦,在低折射率涂覆层和包层区域 103 之间的界面上具有全内反射,用于泵浦传导工作。

[0171] 再次参见图 1-b 的 LCF,可能在由六个低折射率结构 102 形成的纤芯和在六个低折射率结构之外的第一包层区域 103 之间存在强光耦合。

[0172] 在不需要支持任何特定理论的前提下,进一步分析内含涂覆层 104 的光纤性能是有启发的。高折射率或低折射率涂覆层的选择会影响模式的传播特征。不同实施例可以采

用 LCF 作为增益光纤,以便产生高峰或平均功率。高功率多模泵浦通常可用于与双包层光纤组合。

[0173] 再次参见图 1-b, LCF 增益光纤的示例是 LCF100, 它的涂覆层 104 是低折射率聚合物涂覆层, 其中多模泵浦通过包层 103 和低折射率涂覆层 104 之间的界面上的全内反射被传导。单一空间模式激光束在纤芯 101 中被引导, 至少它的一部分用活性离子掺杂。

[0174] 当考虑涂层光纤时, 很多模式在所述双包层 LCF 被传导。图 22 示出了多个计算的 LCF 的低阶模, 所述 LCF 具有 $2\rho=50\text{ }\mu\text{m}$, $d/\Lambda=0.7$, $\Delta n=1.2\times 10^{-3}$ 和 $n_{\text{coating}}=1.37$, 结果通过改变光纤外径而获得。通过标准实验公式在 $\Lambda=1.05\text{ }\mu\text{m}$ 下, 还模拟了背景石英玻璃的色散折射率。

[0175] 如上所述并如图 15-18 所示, 直径的选择还可能显著影响基模和高阶模的限制损耗。纤芯基模由线 2201 表示(它在图 22 中基本是水平的), 而纤芯二阶模分别由线 2202 表示, 其中对应纤芯二阶模的线 2202 表现为在不同的光纤直径处有显而易见的不连续(间断)。类似的不连续性沿线 2201 的部分出现, 但是不太明显。所有其它模式由线 2203 表示, 它作为一族曲线有效显现, 对光纤直径具有很强的相关性, 其中模态折射率一般随着光纤直径的增大而增大。模拟是对光纤直径为 $125\text{ }\mu\text{m}$, 截面示出为 2204, 到光纤直径为 $300\text{ }\mu\text{m}$, 截面示出为 2205 的光纤进行的。对光纤直径为 $125\text{ }\mu\text{m}$ 的基模分布 2206 和二阶模分布 2207 分别以插图形式在图 22 中和以放大图形式在图 22A 和 22F 中示出。

[0176] 传统光纤的纤芯基模一般对应 LP_{01} 或 TEM_{00} 类模式。例如, 在 $125\text{ }\mu\text{m}$ 下的模式 2206 是 TEM_{00} 类(参见图 22A)。基模一般是具有最大有效折射率的模式。

[0177] 图 22 示出了随着光纤直径增大 LCF 的纤芯基模不再是基模。例如, 超过大约 $165\text{ }\mu\text{m}$ 时, 基模形状改变, 如模式 2208 例证(参见图 22B)。另外, 直径大约为 $235\text{ }\mu\text{m}$ 的 LCF 的基模(具有高度非高斯(non-Gaussian)分布), 是模式 2211, 它的大部分功率(能量)位于六个低折射率结构之外的第二包层区域 103(参见图 22D)。换句话说, 对于足够大的光纤直径, 纤芯基模是 LCF 光纤的较高阶模。在任何情况下, 除非另有说明, 本文所用的基模对应纤芯基模。

[0178] 不过, 激励和传播纤芯基模一般不需要详细分析每个 LCF, 或多于传统光学系统。例如, 激励 TEM_{00} 类模式只需要将具有与所述模式非常相关形式的输入光束聚焦到纤芯中。高度的匹配一般是不需要的, 因为在通过 LCF 传播期间抑制了不需要的较高阶模。

[0179] 在图 22 中出现明显不连续的位置被称作“抗-交叉”(例如: 模式彼此交叉), 并且对相对限制损耗具有重要性。图 22 分别示出了强和弱抗-交叉, 并且分别对应模态折射率的较大和较小幅度的不连续。任何两个不同的模式不能具有相同的模态折射率和抗-交叉结果。与不同模式的相对限制损耗相关的抗-交叉在图 23 中示出, 并且将在随后的段落中进一步讨论。强抗-交叉对应强烈的相互作用模式, 例如 2208 和 2209, 其具有类似的空间特征(结构)。所述模式的模态折射率值接近。一个例子是纤芯基模 2208 在 $\sim 170\text{ }\mu\text{m}$ 或纤芯二阶模 2209 在 $\sim 135\text{ }\mu\text{m}$ 。在弱抗-交叉下, 例如交叉模式 2210 在 $\sim 195\text{ }\mu\text{m}$, 模式空间变化更为明显。因此, 可采用抗-交叉来增强模式辨别, 并且在某些光纤实施例中的重要意义。

[0180] 纤芯二阶模存在很多更强的抗-交叉。因此, 在光纤放大器或激光器采用的实施例中, 二阶模可以使它的较大部分功率位于其中没有增益的包层中。更重要的是, 在某些情

况,二阶模传导对于玻璃和涂覆层边界增大的依赖增加了通过宏弯曲和微弯曲以及在玻璃和涂覆层界面处由扰动诱导的耦合向涂覆层和其它模的功率泄漏。

[0181] 上述观察进一步证实,选择光纤直径提供二阶模的较高损耗和基模的较低损耗可能是有利的。在不同的实施例中,选择光纤直径,使得纤芯二阶模处于强抗-交叉。导致纤芯中较高阶模抑制和进一步改进的单模工作。

[0182] 有启发性的是,进一步分析如何选择低或高折射率(涂覆层)覆盖效应传播,同时认可低折射率涂覆层对于双包层构造是常见的。在具有无损耗低折射率涂覆层的双包层 LCF 中,所有传导模式理论上是无损耗的。全内反射出现在大量传导模式的玻璃 103 和涂覆层 104 边界处。尽管所有模式是被传导的,通过玻璃 103 和涂覆层 104 界面传导而更少来自内包层结构 102 传导的模式更易受到宏弯曲和微弯曲的影响。这种易受影响性可能由更大空间存在以及玻璃和涂覆层界面的缺陷造成。功率在这些模式之间耦合,减少了它们在纤芯中的有效传播距离。在所述条件下纤芯中可靠的单模传播只在纤芯基模发生。在纤芯用活性离子掺杂的情况下,只有纤芯基模会被明显放大。不过,这在较高阶模抑制不是关键因素。

[0183] 与低折射率涂覆层的 LCF 相反,在具有高折射率涂覆层的 LCF 中所有模式是泄漏的。高度依赖于低折射率涂覆层并且较少依赖于内包层结构进行引导的模式会迅速泄漏。在这种情况下,限制损耗对模式被内包层结构引导了多少提供良好的衡量,并因此对传播中的模式辨别提供了良好的衡量。当较高折射率涂覆层被较低折射率涂覆层取代时,尽管有些损耗,相应的模态分布保持不变。因此,对于高折射率涂覆层情况的分析为低折射率涂覆层情况提供了模式可靠性的良好衡量。

[0184] 除了某些传输损耗之外,图 22 所示示例 LCF 的相对限制的峰值位置没有受到涂覆层选择的显著影响。具有高折射率涂覆层为 $n_{\text{coating}}=1.54$ 和 $\lambda=1.05 \mu\text{m}$ 的图 22 中相同 LCF 的限制损耗在图 23 中示出。线 2301 和 2303 分别是基模和二阶模的有效折射率。虚线 2302 和实线 2304 分别是基模和二阶模的限制损耗。限制损耗的峰值来自强抗-交叉。有趣的是,具有低折射率涂覆层的峰值保持在与图 22 所示相同的位置。位于抗-交叉处和远离抗-交叉的示例基模分布在图 23 中分别用插图 2306 和 2305,以及在图 23B 和 23D 中分别用放大图示出。位于抗-交叉和远离抗-交叉的示例二阶模分布在图 23 中分别用插图 2308 和 2307,以及在图 23A 和 23C 中分别用放大图示出。

[0185] 再次参见图 23,通过若干光纤直径可以获得二阶模对基模的限制损耗的高比率,并且在本例中对于直径约 $215 \mu\text{m}$ 为最大。如果限制损耗是要考虑的唯一因素,则在一个实施例中,使较高阶模损耗最大化的明确选择是大约 $215 \mu\text{m}$ 的光纤直径,同时要意识到如果直径发生小的变化该比率会迅速改变。通过用光纤直径设置光纤对高或低折射率涂覆层可以获得明显增强的模式辨别,以便在强纤芯二阶模抗-交叉下工作。

[0186] 不过,特定的设计考虑可能导致选择产生非最大值较高阶模损耗的光纤直径,以便获得其它益处。在不同的实施例中,选择光纤第一包层尺寸,例如圆形第一包层的直径 $2\rho_0$,可以根据成本和不同的设计目的进行。例如,对于放大器或激光器设计,要考虑泵抽增益媒介。由于高亮度泵浦二极管的目前成本相对较高,在某些实施例中可能优选对应模式 2308 的较大光纤直径。图 23 示出了二阶模对基模的限制损耗的比率在较大直径处不是最大的,但仍然超过 100:1。较大光纤直径有利于泵浦光耦合入具有较低亮度的泵浦二极

管的泵浦引导件中。

[0187] 相反,如果设计目的是增大或使峰值脉冲或 CW 功率最大化,则可以采用高亮度二极管和最新技术水平的传输光学器件,将能量耦合入较小直径的光纤,例如,增大或使二阶模损耗最大和降低或使基模损耗最小的近似直径。传输光学器件可以包括小型光学元件,用于从单个高亮度二极管或一系列二极管传输能量。如果光纤直径非常大,例如在某些实施例中大于 $300\ \mu\text{m}$,可能会出现影响光束传播的其它考虑因素。因此,某些 LCF 实施例可能采用不贵的二极管和大泵浦包层尺寸,而其它实施例可能采用较小直径泵浦引导件和高亮度二极管。在某些实施例中,较小直径泵浦引导件和高亮度二极管会在减小的光纤长度上导致增强的泵浦功率,导致高峰值功率而没有明显非线性效应。

[0188] 因此,在不同的实施例中,可以采用在大约 $125\ \mu\text{m}$ – $300\ \mu\text{m}$ 范围内的光纤直径,并且基模对二阶模限制损耗的比率一般可以超过 10,或可以在大约 10–100 的范围内。在某些实施例中,所述限制损耗比率可以超过 100。例如,限制损耗的比率可以达到约 500,或者对于长度为几米(例如:1m, 2m, 5m)的光纤可能接近 1000。在 5m 的长度上较高阶模损耗可以超过 10–20dB,并且可以在大约 1–4dB/m, 3–6dB/m 的范围内,或其它范围。

[0189] 泵浦能量可以通过图 1b 所示包层区域 103 和涂覆层 104 之间的界面处的全内反射被引导。在不同的实施例中,低折射率玻璃 107,如图 1c 所示,可以形成泵浦包层。在某些实施例中,泵浦包层可以形成一系列气孔。

[0190] 某些实施例可以采用包层区域 103 作为泵浦引导件。区域 103 的尺寸可以在大约 150 – $400\ \mu\text{m}$ 的范围内,并且可能超过大约 $500\ \mu\text{m}$ 。纤芯尺寸可以在大约 50 – $150\ \mu\text{m}$ 的范围内。在某些实施例中,纤芯尺寸可以是泵浦引导件尺寸的大约 20–40%,并且可能足够小,以便使较高阶模损耗最大和 / 或使弯曲损耗最小。

[0191] 使用了具有低折射率涂覆层的 LCF 的示例和特性,以说明双包层光纤的特性。可以采用其它合适的替代方案。例如,在至少一个实施例中,具有低折射率的玻璃可用作低折射率涂覆层的替代。玻璃可以是高度氟掺杂的石英。另一个替代方案可以是一层或多层气孔来取代低折射率涂覆层。再次参见图 1B,可以形成气孔层来取代涂覆层 104。另外,可以在高度氟掺杂的石英和气孔之外的地方添加额外的石英(未示出)。许多变化形式是可行的。

[0192] LCF 的波长敏感特性也是感兴趣的,图 24 示出了 LCF 在强纤芯二阶模抗 - 交叉下在 $268\ \mu\text{m}$ 的光纤直径下工作的示例。分别用于基模和二阶模的限制损耗 2401 和 2402 在一范围内的波长进行模拟。基模分布 2405 和二阶模分布 2406 在图 24 中以插图形式和在图 24A 中以放大图形式示出。图 24 表示在 $\lambda = 1.05\ \mu\text{m}$ 下获得的损耗比率 2403, α_{2nd}/α_{FM} , 高达 337,并且在超过 200 纳米的范围 α_{2nd}/α_{FM} 大于 100,表示在标准 LCF 中在损耗比率 2404 上的至少一个数量级的改进,而没有考虑低折射率结构之外的区域。本文所用的共振增强是指增强的二阶模抑制,例如如图 23 和 24 所示。不过,在某些光纤实施例中,是预选的直径而不是波长提供了增强作用。在某些实施例中,通过选择至少一个合适的直径和 / 或一般在二阶模抗 - 交叉下操作 LCF,获得增强的较高阶抑制。例如,如图 24 所示,该 $268\ \mu\text{m}$ - 直径的光纤实施例在约 $1.05\ \mu\text{m}$ 的波长下工作提供了显著的较高阶模抑制(例如, α_{2nd}/α_{FM} , 大约 337)。

[0193] 制备的被动和主动 LCF,以及性能数据的示例

[0194] 以下段落阐述被动 PCF 和 LCF 功率放大器的性能的示例。某些感兴趣的参数包括光束质量和由弯曲造成的损耗变化,传播的波长相关性,以及由应力光学效应造成的折射率变化。

[0195] 利用公知的层叠-和-拉制技术制备了若干个 LCF,它具有从 30-180 μm 的不同纤芯直径,并且具有从 0.7-0.9 的 d/Λ ,其中相同直径的棒呈六边形层叠,以形成束。所述束随后被插入要拉制成光纤的管,所述管内具有适当的气压和真空控制。还制备了镜-掺杂的光纤。图 24 和 24B 中示出了非圆形截面 2407。LCF 的 $2\rho=52.7\mu\text{m}$, $d/\Lambda=0.8$,以及包层的 $n_{\text{coating}}=1.37$ 。玻璃外径为 254.2 μm (“平面到平面”测量,例如,从基本扁平的表面到相对的基本扁平的表面),并且有效模态面积计算为 1548 μm^2 ,在 976nm 下测得的泵浦吸收为 $\sim 11\text{dB/m}$ 。纤芯的中心部分用镱离子掺杂。镜-掺杂的玻璃用专门开发的工艺制成,以便生产出的玻璃具有极好的折射率均匀性,并且与光纤其余部分匹配的精确折射率。在本示例中,这些步骤保留了希望的模态图以及可靠的单模工作。

[0196] 在该 LCF 的单模传播的可靠性的第一次测试中,松弛卷绕成 $\sim 50\text{cm}$ 直径卷的 6m 光纤的输出由 CCD 摄像机校准和成像,同时调整输入条件。注意在本示例中 LCF 是双包层镜-掺杂的光纤,但是在本实验中光纤被用于未泵浦结构。不过,输出模态图是稳定的,并且即使在发射条件被调至与最佳条件差很多的情况下也没有观察到较高阶模,证明了较高阶模即使在未泵浦双包层放大器光纤中也具有高得多的传播损耗。在该第一测试期间,输出模态图是稳定的,并且保持基模,同时通过两个手指间的按压和弯曲对光纤进行处理。

[0197] 为了表征传播的波长相关性,在 480-1100nm 波长范围内在通过该 LCF 的 20cm 长度传播超连续源之后的输出模式通过 CCD 捕获,并且所述输出模式在图 24 和图 24B 中的上部插图以图像 2408-2414 的形式示出。硅 CCD 响应性远远低于 1100nm,因此没有采集到数据。清楚的宽带单模工作在 800nm 以上是明显的,同时较高阶模含量向低于 800nm 的较短波长有增加的迹象。图 24 示出了对于具有 50 μm 纤芯的该 LCF,模拟的二阶模朝向较短的波长传输逐渐增强,在 800nm 处达到 $\sim 1\text{dB/m}$ 的损耗。尽管事实是该 LCF 具有低折射率涂覆层,而模拟的光纤具有高折射率涂覆层,模拟提供了与实验良好的吻合性。

[0198] 图 25 在插图 2501 中示出了被动 LCF 的多个特征和性能数据,所述 LCF 具有 $2\rho=101\mu\text{m}$, $d/\Lambda=0.8$,和包层的 $n_{\text{coating}}=1.54$ 。该 LCF 的有效模态面积计算为 5117 μm^2 。光纤的截面 2502 在插图 2501 和图 25A 中示出。该 LCF $\sim 6\text{m}$ 长的长度松弛地卷绕成 1m 的卷。 M^2 常用于光束质量测量。 M^2 值为 1 对应‘完美的’高斯型光束分布,所有实际光束的 M^2 值 >1 。用 ASE 源和 Spiricon M^2-200 测得的 M^2 为 $M^2_x=1.26$,以及 $M^2_y=1.29$ 。图 25 还在插图 2504 中示出了另一 LCF 的特征和性能,所述 LCF 具有 $2\rho=183.3\mu\text{m}$, $d/\Lambda=0.8$,以及包层的 $n_{\text{coating}}=1.54$ 。还示出了相同尺度的传统单模光纤(SMF)的截面 2507,用于与插图 2504 和图 25B 所示的截面 2505 进行比较。该 LCF 的有效模态面积计算为 15861 μm^2 ,相信是最高记录的有效模态面积并且在传统单模光纤上具有超两个数量级的改进。用 ASE 源测得的 1m 直光纤的 M^2 为 $M^2_x=1.22$,和 $M^2_y=1.23$ 。在光纤的输出端测得的模态图 2503 和 2506 还分别在图 25 的插图 2501 和 2504,和分别在图 25A 和 25B 中示出。

[0199] 图 25 示出了纤芯直径分别为 35 μm , 40 μm , 50 μm , 和 101 μm 的四种 LCF 的弯曲损耗测量结果 2508, 2509, 2510 和 2511。光纤首先放置在具有不同直径的预制圆形槽中。在确定输出模态图之后,随后测量每卷直径的传输。通过单独的缩减测量测得光纤的绝对传

输。绝对传输随后被用于再次校准相对弯曲损耗测量结果。LCF 的某些实施例的弯曲能力随着纤芯直径的增大减少得很快。该效应基本与下述事实相关：引导模式操纵弯曲的能力与一模式怎样迅速改变其空间形态而又不破坏传播，例如，保持绝热转换相关。随着模式变大，这种改变的能力在某些情况下减弱地非常快。绘制在 2dB/m 下测得的临界弯曲半径在图 25 的插图和图 25C 中是开环，并且与 $\rho^{2.5}$ 相关性曲线 2512 很好地拟合。

[0200] 图 24-25 示出的示例对应被动光纤，例如：在测试期间没有注入泵浦光束。

[0201] 将大芯径 LCF 用于高峰值脉冲或 CW 功率应用具有相当重要的价值。举例来说，图 10-13 和 16-21，以及相关的美国专利申请序列号 11/134,856，申请日为 2005 年 5 月 30 日，美国专利公开号为 2006/0263024，名称为“在具有大泄漏通道的光纤和棒中的单模传播 (SingleModePropagationinFibersandRodswithLarge LeakageChannels)”的文献示出了不同的装置和系统构造。例如，美国专利申请号 11/134,856 的图 11 示意性地示出了大模面积光纤的一个实施例，它包括用稀土离子掺杂的纤芯，用于光纤放大器或由多模泵浦源泵送的激光器。

[0202] 参见本申请的图 26C，图 26C 示意性地示出了大模面积光纤的一个实施例，它包括用稀土离子掺杂的纤芯，可用于光纤放大器或由多模泵浦源泵送的激光器。在该实施例中，光纤具有直的输入和输出端 2651, 2652，以及介于其间的卷绕部分。多模泵浦 2655 被用于利用耦合透镜 2654 泵浦放大器或激光器。输入光束 2656 通过透镜 2653 被发射入光纤 2650。输出 2657 由分色镜 2658 分离。

[0203] 最初，为了测试主动体制中的光纤性能，根据结合图 24 和 24A, 24B 所示和所述的 3m 的镜-掺杂 LCF 构造单级光纤放大器。图 26 在插图 2601 中示出了这种光纤的特征和性能，所述光纤具有截面 2602（也在图 26A 中示出）。放大器光纤末端带角度切割成 $\sim 8^\circ$ 。该放大器由微型芯片激光器注入，所述激光器在 1062nm 下工作，在 25kHz 的重复频率 (5 μ J 脉冲能量) 下具有 125mW 的输出，并且该放大器是反方向泵送的。微型芯片激光器的测得脉冲持续时间为 600ps。放大器性能 2603 在图 26 中进行了概述。测得的放大斜率效率为 $\sim 57\%$ 。在开始以放大器增益峰值为 $\sim 1026\text{nm}$ (例如：可用的 1062nm 输入相对增益峰值偏移) 产生激光之前，获得了 7W (320 μ J) 的最大功率。对于两个正交方向，在 7W 输出功率下测得的 M^2 (以插图 2605 示出) 分别为 $M_x^2=1.17$ ，和 $M_y^2=1.18$ 。在图 26 的插图和图 26B 中还示出了输出模式 2606。

[0204] 用该 LCF 处理高峰值功率的可能性利用两级 LCF 光纤放大器结构进行了测试。LCF 放大器的每一级包括直的输入和输出端，在它们之间具有卷绕部分，并且卷绕直径为大约 0.5m。放大器输出受可用的泵浦功率的限制。在低于光纤的非线性阈值下工作是明显的，因为没有观察到明显的自相位调制和拉曼 (Raman) 散射迹象。图 26 中示出了用 400 μ J 脉冲能量测得的光谱 2605。放大的自发发射水平超过 40dB 低于输出光谱 2605 的放大信号水平。

[0205] 在不同的实施例中，LCF 放大器和 / 或激光器可以提供在 10 μ J-10mJ 范围内的脉冲能量下的工作，并且在某些实施例中优选的工作范围从大约 100 μ J 到大约 1mJ。例如，CW 或脉冲工作可用于产生在 KHz 或 MHz 重复率的脉冲。在至少一个实施例中，输出光束一般可以具有低数值孔，并且可能尤其适于输出光束的光纤传输，可用的用途包括，例如，焊接，切割和标记。在不同的实施例中，可以采用 LCF 光纤生成超短脉冲，例如用于啁啾 (chirped)

脉冲放大(CPA)系统。通过适当的光束成型和放大率光学器件,可以利用高峰值功率脉冲进行显微机械加工应用,具有高光束质量,例如, M^2 值在大约 1.1-1.5 的范围内,利用所有光纤系统。在某些实施例中,可以采用变频器,以产生可见或接近 UV 脉冲的高峰值功率。在某些实施例中,可以产生在大约 $1\ \mu\text{m}$ - $50\ \mu\text{m}$ 范围内的接近衍射极限的光斑尺寸。

[0206] 不同的激光器或放大器实施例可用于全光纤设计,用于生成飞秒,皮秒,和纳秒区间的高峰值功率脉冲,具有可忽略的非线性效应。在一个示例实施例中,可以采用大约 $70\ \mu\text{m}$ - $100\ \mu\text{m}$ 或更大的纤芯直径来产生纳秒脉冲,它的能量为若干 mJ- 大约 10mJ。可以产生示例脉冲宽度为大约 1-10ps 的超短脉冲,输出能量在大约 $10\ \mu\text{J}$ 至几百 μJ 的范围内。

[0207] 图 26D 示意性地示出了示例的基于激光器的材料加工系统,它可被设置成具有图 26C 所示的大模面积放大器系统 2670。系统 2670 也可被设置为多级放大器(未示出)。光学系统 2672 可以向靶 2675 输送近似衍射极限的光束。光斑尺寸一般取决于用途,但是可以在大约 $1\ \mu\text{m}$ - $250\ \mu\text{m}$ 的范围内。光学系统 2672 还可以包括扫描镜或其它合适的光束定位设备。靶 2675 还可以安装在平移和 / 或旋转定位台上,控制器 2677 协调激光器、光学系统、和任何定位机构的作业。

[0208] 该实施例的 LCF 光纤的其它特征包括测量 LCF 折射率变化,它可能受到 LCF 光纤的不同特性的影响,包括,例如,包层结构的大小和 / 或间距,包层和 / 或包层结构的热膨胀系数,等等。

[0209] 图 27 示出了该 LCF 的测得的 2D 折射率 2700,示出了具有掺杂的中央部分 2703 和低折射率结构 2701 的纤芯 2702。低折射率结构 2701 周围的区域 2704 具有增大的折射率。折射率增大可能由石英和掺氟石英的不同材料特性,尤其是由不同的热膨胀系数 δT 造成。由于光纤在高温下拉制,具有较高热膨胀系数的掺氟石英试图不仅仅收缩周围的石英玻璃。不过,该收缩受到周围石英的限制。掺氟石英在光纤中受到张力作用,而周围的石英在室温下受到压制。由于应力光学效应,该应力显然会引起应力指数指数变化。

[0210] 在某些光纤实施例中可能出现指数的局部变化,这是由于结构和第一包层材料的不同热特性导致的。不过,在某些用 LCF 光纤的示例实验中观察到 LCF 引导机制。在某些情况,较大的结构尺寸,排列和结构数量作为主要机理提供 LCF 引导。

[0211] 在某些实施例中,结构尺寸和排列可能影响纤芯区域(或其它光纤区域)的折射率分布,例如增大折射率的相对变化。增大结构尺寸和间距(例如,缩放整体尺寸)一般会导致较大的相对折射率变化(例如:更大的最大折射率调制)。由应力光学效应导致的净折射率变化可以包括来自邻近结构的补偿贡献,并且在某些情况,所述净结果取决于结构间距。例如,间距更紧密在一起的较小结构一般会产生降低的折射率调制。在不同的实施例中,可以预选结构尺寸和 / 或间距,以便调节包层和 / 或纤芯区域的折射率分布。在某些实施例中,可以预选包括包层和包层结构的材料,以便调节包层和 / 或纤芯区域的折射率分布。例如,在某些实施例中,可以至少部分根据材料的热膨胀系数值来选择材料。在某些实施例中,包层结构可以包括氟掺杂的石英,并且所述包层可以包括石英。其它材料,例如,掺杂和 / 或未掺杂的玻璃,可用于其它实施例中。

[0212] 制备的 LCF 示例:N=2-- 模态损耗和弯曲损耗

[0213] 在不同的实施例中,其中如图 1b 和 1c 所示包层结构设置在单层(例如:环)中, d/Λ 的通常值可以在大约 0.65-0.9,0.7-0.9,或 0.75-0.85 的范围内。在某些实施例中,至

少第二层结构($N \geq 2$)可以设置在包层结构 102 之外,并且在某些情况下 d/Λ 的通常范围可以在大约 0.3-0.9, 0.4-0.8, 0.5-0.7, 或 0.5-0.8 的范围内。可以使用其它范围的 d/Λ , 用于任意层的包层结构。如果使用多于一层的包层结构, d/Λ 的比率可能(但不必要)对于每层包层结构是不同的。

[0214] 图 31 示出了制备的 LCF 的截面,所述 LCF 具有两层包层结构 3102, $d/\Lambda=0.6$, 基本围绕纤芯 3101, 以及另一外包层 3103。该 LCF 的纤芯直径为 $45 \mu\text{m}$, 并且光纤直径为大约 $400 \mu\text{m}$ 。这种设计为该示例 LCF 提供了进一步改进的较高阶模损耗,但是具有略高的弯曲损耗。图 32 示出了具有两层包层结构的示例 LCF 中基模和二阶模的计算限制损耗。对不同的 d/Λ 绘制了基模限制损耗 3201 和二阶模限制损耗 3202。在该示例计算中不包括外包层。假设包层结构放置在无限(非限定)的包层中。从图 32 可以看到,以百计的限制损耗比率可以在 d/Λ 的较大范围内容易地获得。在某些实施例中,进一步仔细选择的外包层尺寸能够进一步改进该比率。具有其它额外层($N>2$)的某些 LCF 实施例可以进一步改进损耗比率,但是在某些情况,其代价是具有较差的弯曲损耗性能。

[0215] 制备的 PCF 和示例测试结果

[0216] 回到图 19,该附图示出了 $N=3$ 的 LCF 的实施例,与传统光子晶体光纤的区别在于几层孔。

[0217] 在包层中具有气孔的无尽单模 PCF 是由 Birks 等人首先报导的,它的独特特性是大大延伸了传统光纤的单模(SM)体制。这一特征的直接后果是显著增大了 SM 光纤的纤芯直径。这有利于扩展商用光纤激光器的高峰值功率,它由于紧凑的纤芯限制而受到非线性效应的制约。

[0218] 不过,在具有气孔的光纤的某些实施例中存在诸多缺陷。无尽 SM 光纤中小气孔的尺寸关键取决于在光纤拉制工艺过程中强的表面张力和压力的平衡,并因此难以再现。气孔还必须被密封在装置中,以避免环境污染,这通常会对模态质量产生负面影响,特别是对具有大芯径的光纤更是如此。全玻璃 PCF 由于它便于制备并且采用现有传统光纤已经开发成熟的类似处理技术肯定具有吸引力。

[0219] 如上文所述,结构尺寸和排列,材料热特性,和其它因素中的一个或多个可以(单独或以不同的组合)影响纤芯区域(或其它光纤区域)的折射率分布,例如增大相对变化。局部变化可能导致折射率(非-PCF)引导。在某些实施中,如果不适当考虑这种令人吃惊的引导机制,所得到的输出模式会偏离希望或预期的形状。在得到适当考虑时,折射率引导可以提供新的和有趣的引导机制,用于 PCF。下述示例示出了 PCF 光纤的实施例中折射率调制对引导和模态分布的影响。

[0220] 制备了全玻璃 PCF,具有 $d/\Lambda=0.35$, 和纤芯直径为 $47 \mu\text{m}$ 。光纤的截面 2800 在图 28A 示出,而它的折射率分布 2801 在图 28B 示出。示出低折射率结构 2802,沿上升的折射率环 2804,围绕每个低折射率结构 2802,这是由于热特性不匹配造成的。上升的折射率环 2804 还在纤芯 2803 产生高折射率部分。一长度的该光纤保持为直的,同时不同的波长测量输出模式。图 28C 示出了分别在波长 780nm, 800nm, 910nm, 980nm, 1000nm 和 1100nm 下的模式 2810, 2811, 2812, 2813, 2814 和 2815。由于存在较低波长截止值,PCF 引导朝向较短的波长变弱。示例光纤的实施例在低于 780nm 时不能很好引导,给出最大正常化纤芯直径为 $2\rho/\lambda \approx 60$ 。

[0221] 图 28A 所示光纤的一部分预制件被拉制成光纤,其直径为 $\sim 700\ \mu\text{m}$,并且纤芯直径为 $\sim 130\ \mu\text{m}$ 。在光纤中央的直径 $\sim 80\ \mu\text{m}$ 的升起折射率部分开始引导图 29 所示的单模。模式 2901,2902,2903,2904,2905 和 2906 分别在 780nm,800nm,850nm,910nm,1000nm 和 1050nm 的波长下测得。基模工作在 $1\ \mu\text{m}$ 非常可靠,并且在低于 850nm 时看到较高阶模含量。模式 2911,2912,2913,2914,2915 和 2916 是在 $1\ \mu\text{m}$ 波长下调节发射条件时捕获的模式。在该例子中,在该调节范围内没有其它模式可被引导。在任何情况下,从图像 2920 最显而易见,模式不是由通常 PCF 引导进行导向的。获取的图像 2920 阐明了光纤截面。在图 29 中,可以清楚地看到模式 2921 没有延伸到低折射率结构 2922。另外,模式 2921 基本上居于光纤的纤芯区域内(例如,由低折射率结构 2922 的内层为边界的区域)。模式形状没有表现出包层结构的特征,例如,如图 28C 中的模态分布 2814 所示,其形状表示用包层结构引导的模式。

[0222] 测量并在图 30 中示出了沿穿过光纤中心和多个掺氟棒的线的光纤截面上折射率变化。上升的折射率纤芯 3001 的直径为 2ρ 。还示出了来自掺氟玻璃的折射率下降 3002,连同折射率下降 3002 周围由于应力效应产生的上升折射率环 3003。在某些实施例中,在纤芯一部分中的折射率变化可能近似于抛物线。折射率变化可允许在具有不均匀折射率的纤芯的一部分内引导基模。例如,模式直径可以是纤芯直径的分数,例如大约 50%。

[0223] 非-PCF 引导是实验的惊人的结果。它暗示在大芯径光纤中的传统 PCF 引导可能局限于只有小气孔形成于第一包层区域的光纤实施例,使用除玻璃以外的材料的构造,或可能用气体充满孔的构造。所述结果还暗示,某些可行的 PCF 设计对于全玻璃、大芯径光纤不是优选的。在某些大芯径实施例中,可以采用具有良好匹配热膨胀系数的玻璃。减小纤芯尺寸,例如至 $50\ \mu\text{m}$,在某些情况下一般也可能改进性能。

[0224] 与各种 LCF 实施例相反,为本 PCF 示例选择的排列和较小的结构尺寸增加了局部折射率变化。所述局部变化可用于非-PCF 引导。

[0225] 在至少一个实施例中,全玻璃光纤可以包括具有第一热膨胀系数的第一包层材料。其它层($N \geq 2$)的包层结构可以设置在第一包层材料中,并且这些结构与通常 LCF 包层结构的尺寸相比可能尺寸减小。包层结构可以包括具有第二热膨胀系数的第二包层材料。靠近包层结构可以存在局部增大的折射率。另外,纤芯区域可以由包层结构的第一内层限制边界。纤芯区域的一部分可以表现不均匀折射率分布,如图 30 所示,形成折射率梯度。参见图 30,从上升的折射率纤芯区域 3001 的峰值到局部最小值 3005 测得的示例相对折射率差小于约 5×10^{-4} ,并且通常可能小于约 1×10^{-3} 。每个局部最小值 3005 之外的增大的局部折射率对应向低折射率包层结构的过渡。从峰值到局部最小值的局部梯度足够大,以便在至少一部分的纤芯区域内引起基模的折射率引导。相对折射率差可能由应力光学效应导致。

[0226] 在不同的实施例中,大芯径光纤的直径可以在大约 $30\ \mu\text{m}$ - $200\ \mu\text{m}$ 的范围内。所述光纤的应用可以在下述中找到,例如,在大功率啁啾脉冲放大系统,非线性放大器,以及扩大输入脉冲光谱的连续发生器。所述高峰值功率脉冲具有足够高的强度,以便超过光纤媒介的非线性阈值。在某些实施例中,前置放大器或功率放大器可以通过对纤芯进行掺杂而形成。

[0227] 不同的实施例可以采用“全光纤”设计,或至少构造能减少块状光学部件的数量。

所述实施例可以包括上述的任何示例“全玻璃”设计。集成结构可用于N=1,2,3,或更大数量的层,偏振或非偏振保持光纤,不同的泵浦引导结构,涂覆层,以及不同的包层结构。集成设计还可用于激光器和放大器,包括多级设计。不同的集成设计可能特别有利于光纤阵列,例如大功率相干阵列等等。结构可用于示例应用,包括材料加工,激光雷达,和通信。

[0228] 在某些实施例中,不同组合的放大器和传输光纤可被接合,并且有效耦合能量,同时保留光束质量。例如,可能不需要图 26C 中的透镜 2653,或其它块状光学部件。可以利用接合(拼接)将输入光束有效耦合到大芯径光纤 2650,同时保持合适的衍射极限光束质量。

[0229] 图 33A (不按比例) 是截面图,示意性地示出了具有稀土掺杂的大芯径 3315 和包层结构 102 的 LCF3320。具有纤芯 3305 的单模(或若干模)光纤 3300 被结合(拼接)到光纤 3320。在本示例中,光纤 3300 和 3320 的外径大致相等,但是可以选择具有不等外径的光纤。光纤在接近平面 3310 处被接合。

[0230] 举例来说,可利用商用的 CORNING® HI1060 单模特种光纤作为单模光纤 3300。光纤参数包括模场直径为大约 $6.2\ \mu\text{m}$,长度为大约 1.2m,数值孔径为大约 0.14,和截止波长为 $920\text{nm}\pm 50\text{nm}$ 。LCF3320 可以是全玻璃制备的 LCF,具有大约 80cm 的长度, $53\ \mu\text{m}$ 的纤芯,相应的模场直径为大约 $43\ \mu\text{m}$,并且具有比光纤 3300 更小的数值孔径。在本例子中,LCF3320 与单模光纤 3300 对准并接合(拼接)在一起。

[0231] 两个单模光纤之间直接对接耦合所预期的最大功率耦合可以计算如下(例如,参见 Ghatak, "Buttcoupling between single mode fibers", in Introduction to Fiber Optics, Cambridge University Press, 1998, p153):

$$[0232] \quad T_0 = (2 * \omega_1 * \omega_2)^2 / (\omega_1^2 + \omega_2^2)^2, \text{dB}_{\text{Loss}} = -10 \log_{10} (T_0)$$

[0233] 其中, ω_1 和 ω_2 是相应的模式直径。如果上述的两个光纤 3300, 3320 直接耦合(对接耦合),预计会有大约 11dB 的损耗。因此,需要某种机构来扩大或以其它方式匹配模场,以避免所述损耗。

[0234] 在一个示例中,通过利用源来进行接合(拼接),以便测量和对准两种光纤的纤芯。作为第一步,通过在 CCD 摄像机(照相机)上成像来激励和验证基模。照相机随后被光学功率计取代,以测量损耗。一旦建立了两种光纤的对准,通过加热邻近平面 3310 的区域进行接合(拼接)工艺。

[0235] 证实了一个令人吃惊的有效耦合结构。在不支持任何特定理论的前提下,结果表明,纤芯材料 3305a 的掺杂剂在拼接期间扩散,并且增大了光纤 3300 的纤芯尺寸。施加多个电弧(而不仅仅是一个电弧)来加热光纤末端并且连接光纤(例如,在本例中通过熔融拼接),进一步增强了单模光纤 3300 的模场。观察到在大约 1060nm 波长下较小的 2.8dB 损耗,以及在波长 $1.3\ \mu\text{m}$ 下大约 1.5dB 的降低的损耗。所观察到的损耗远小于通过直接耦合可获得的损耗(例如:在本例中为 2.8dB 而不是 11dB)。尽管在不同光纤之间存在可测量到的效率变化,所证实的损耗降低是显著的。

[0236] 图 33B 示意性地示出了拼接之后图 33A 的 LCF3320 和单模光纤。示出纤芯 3305a 的尺寸相对于纤芯 3305 有所扩大。结果,输入光束可以从光纤 3300 传输到 LCF3320,具有低损耗,并且在模式质量上没有显著的妥协折衷。

[0237] 图 33C 示意性地示出了相对于包层结构的模态分布的示例,示例纤芯基模和 LCF 引导的传播。示出接近 $1/e^2$ 光束直径 3330,对应纤芯尺寸的大约 80%。

[0238] 图 33D 示出了制备的 LCF 的输出的照片,其中 LCF 和单模光纤如图 33B 所示接合。照片示出相对于包层结构的纤芯基模,并且显示了 LCF 引导。相对于包层结构的模式直径密切对应于图 33C 所示的示意图。

[0239] 图 33A-33C 示意性地示出了单模光纤和 LCF 具有相同外径的一个示例。LCF 的接合并不如此受限,并且单模光纤直径可以不同于 LCF 直径。

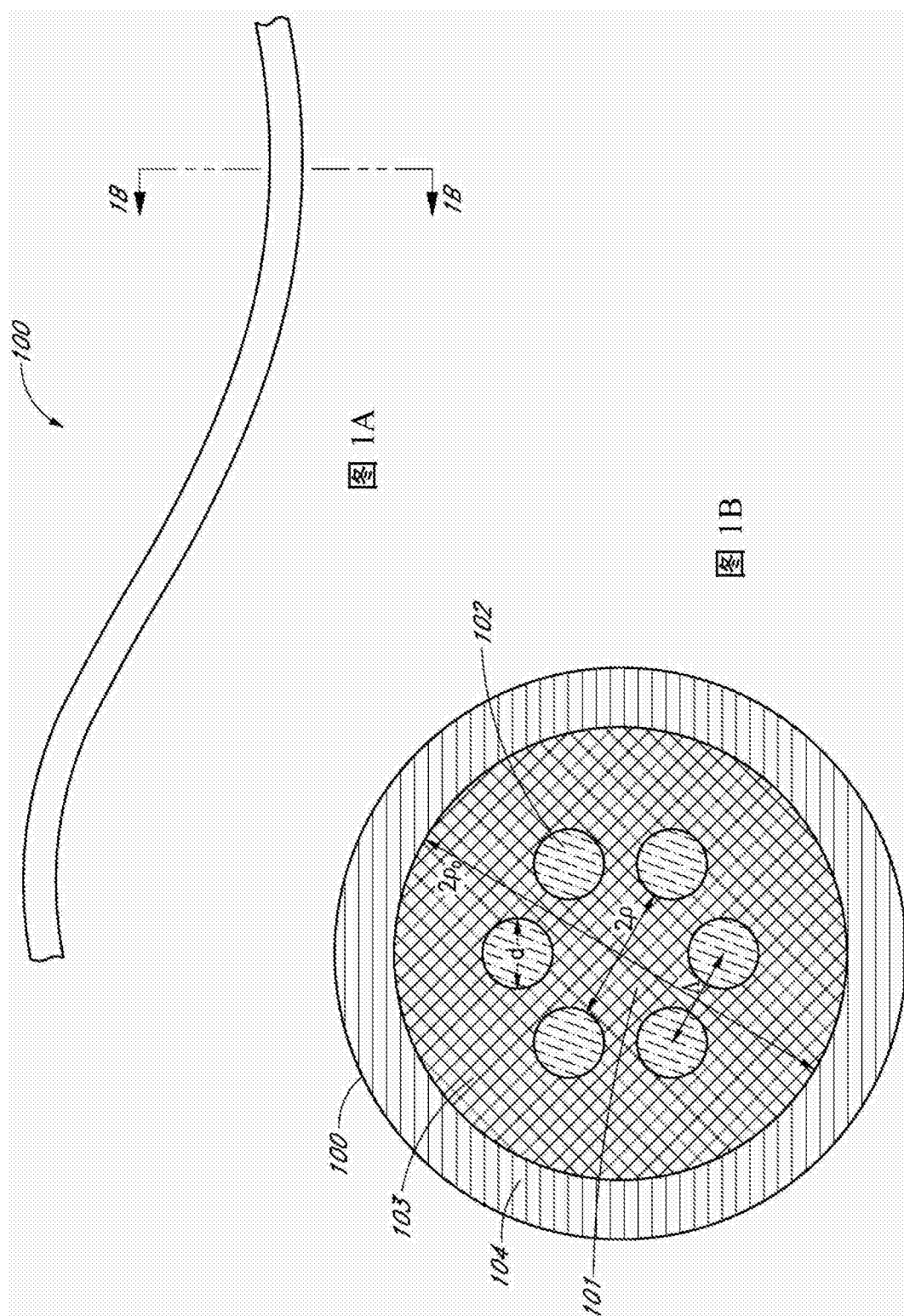
[0240] 在某些实施例中,可以利用中间光纤,并且在每一端进行接合。所述结构可以提供有效耦合至具有比上述示例的 $53\text{ }\mu\text{m}$ 纤芯更大纤芯的 LCF。

[0241] 大芯径光纤可用于各种装置、系统和应用中。例如,大芯径光纤可用作高峰值功率脉冲以及 CW 激光器的被动传输光纤。纤芯可以用稀土掺杂的,以便用于光纤激光器或激光放大器。高峰值功率放大通常用于具有皮秒或飞秒脉冲宽度的超短脉冲,例如,用于直接放大和啁啾脉冲放大系统的结构。

[0242] 举例来说,具体参见图 10-13,和 16-21 以及下述相关文本:美国专利申请序列号 11/134,856,申请日为 2005 年 5 月 30 日,名称为“在大泄漏信道的光纤和棒中的单模传播 (SingleModePropagationinFibersandRodswithLarge LeakageChannels)”,它示出了不同装置和系统结构,可被改进以使用本文所披露的光子晶体光纤,无尽单模光子晶体光纤和泄漏信道光纤构造。例如,本发明的实施例可用于很多光学系统中,包括放大器,激光器,短或超短脉冲发生器,Q 开关激光器和其它系统。本发明的实施例可用于金属、半导体、和绝缘材料的基于激光改性的系统,采用红外线,可见光,和 / 或 UV 波长。其它应用也是可行的。

[0243] 其它多种替代结构也是可行的。例如,可以增加、除去、或重新排列部件(例如各层)。类似地,可以增加、除去、或重新排序加工和方法步骤。

[0244] 因此,尽管本文所述的发明已在某些优选实施例和示例中进行了说明,本领域技术人员应当理解,本发明的范围可以延伸超出具体披露的实施例,包括本发明的替代实施例和 / 或用途,以及其明显的改动和等同方案。另外,尽管已示出并且详细说明了本发明的若干变化,属于本发明范畴的其它改进对于本领域技术人员在阅读本说明书之后是显而易见的。还可以预见,可以对实施例的特定特征和方面进行各种组合或次组合,并且仍然属于本发明的范畴。应当理解,所披露的实施例的各种特征和方面可以彼此组合或彼此取代,以便形成所披露发明的不同模式。因此,希望本文所述的本发明范围不应当受到上文所披露的具体实施例的限制。



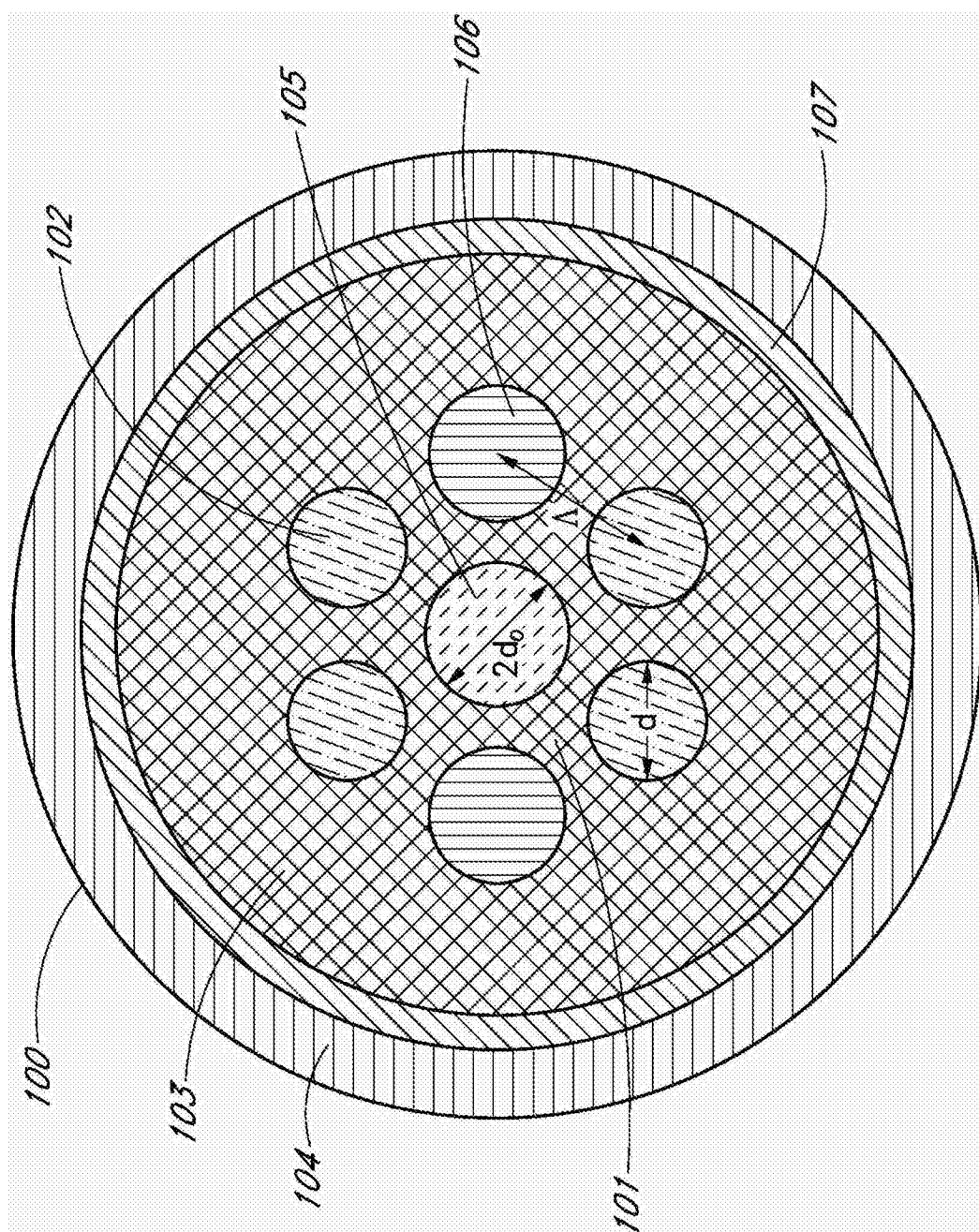


图 1C

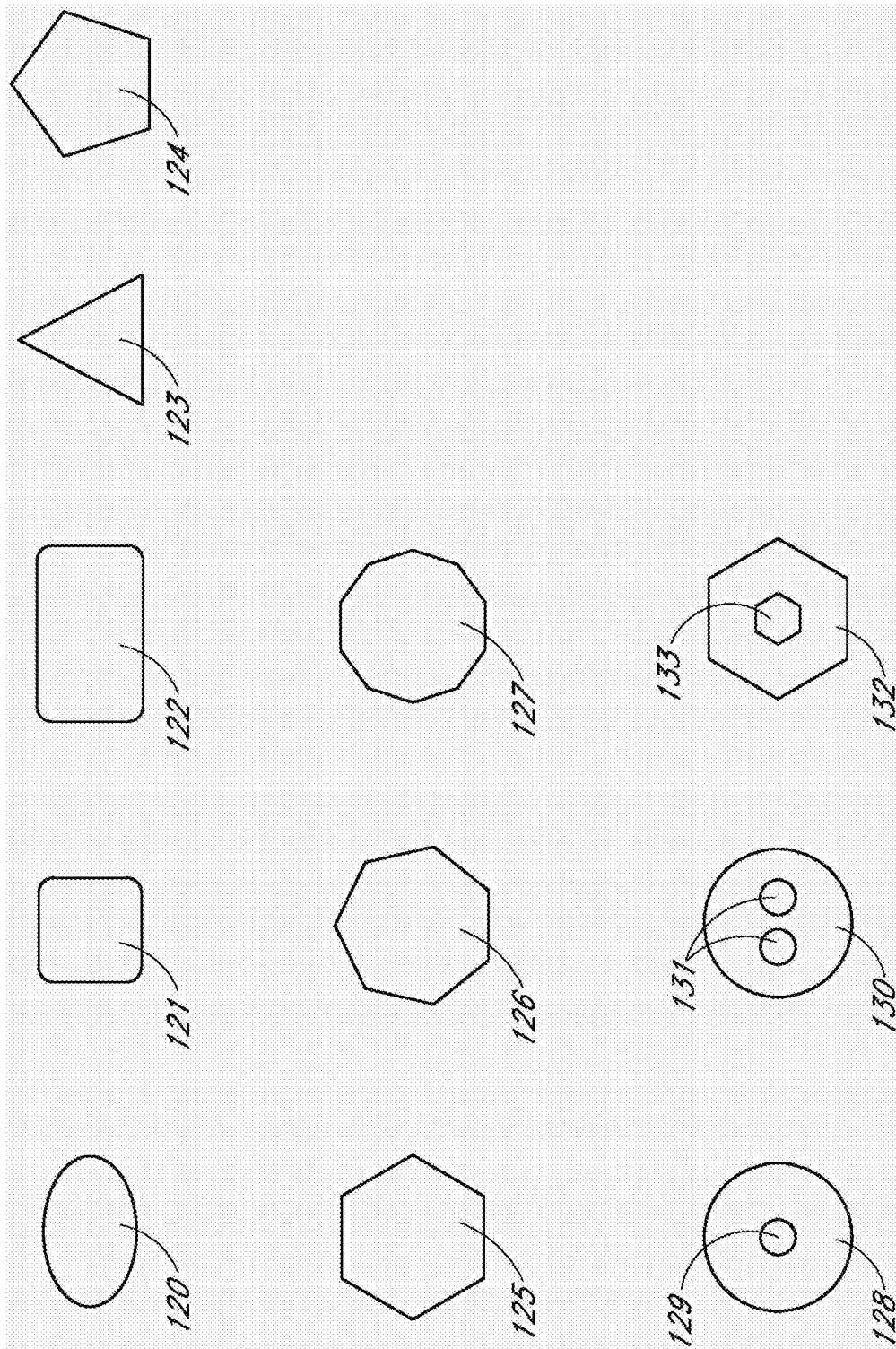


图 1D

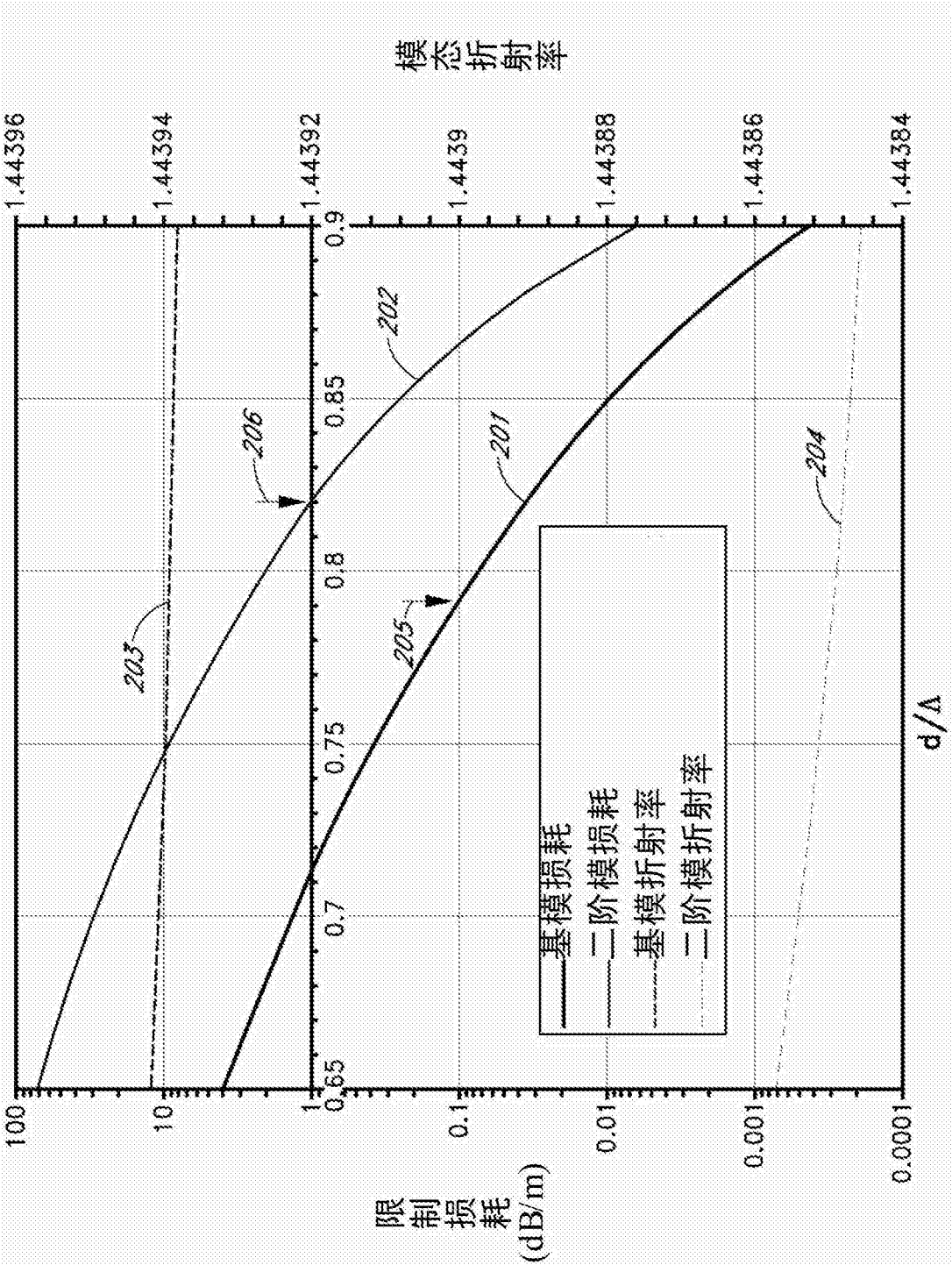


图 2

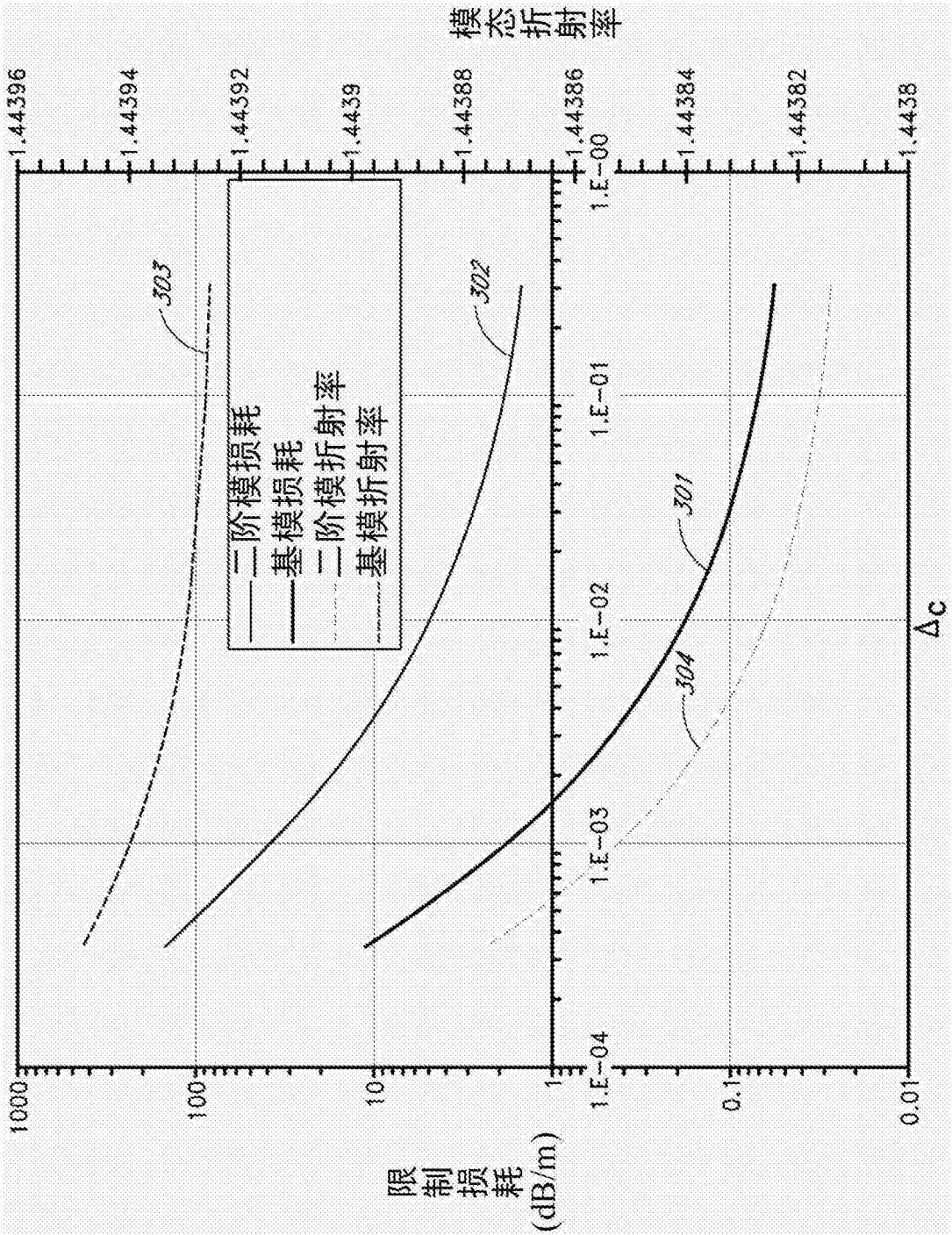


图 3

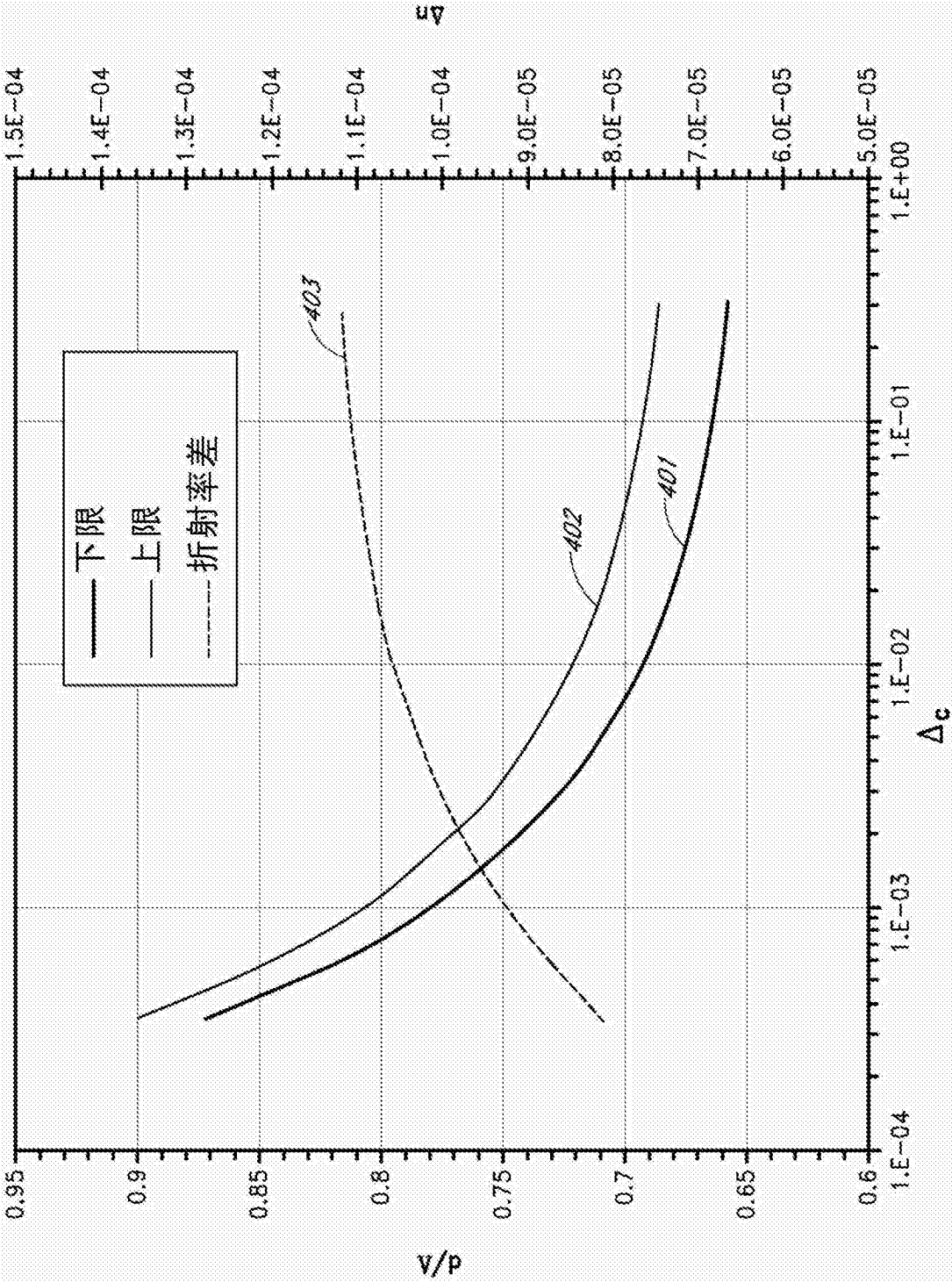


图 4

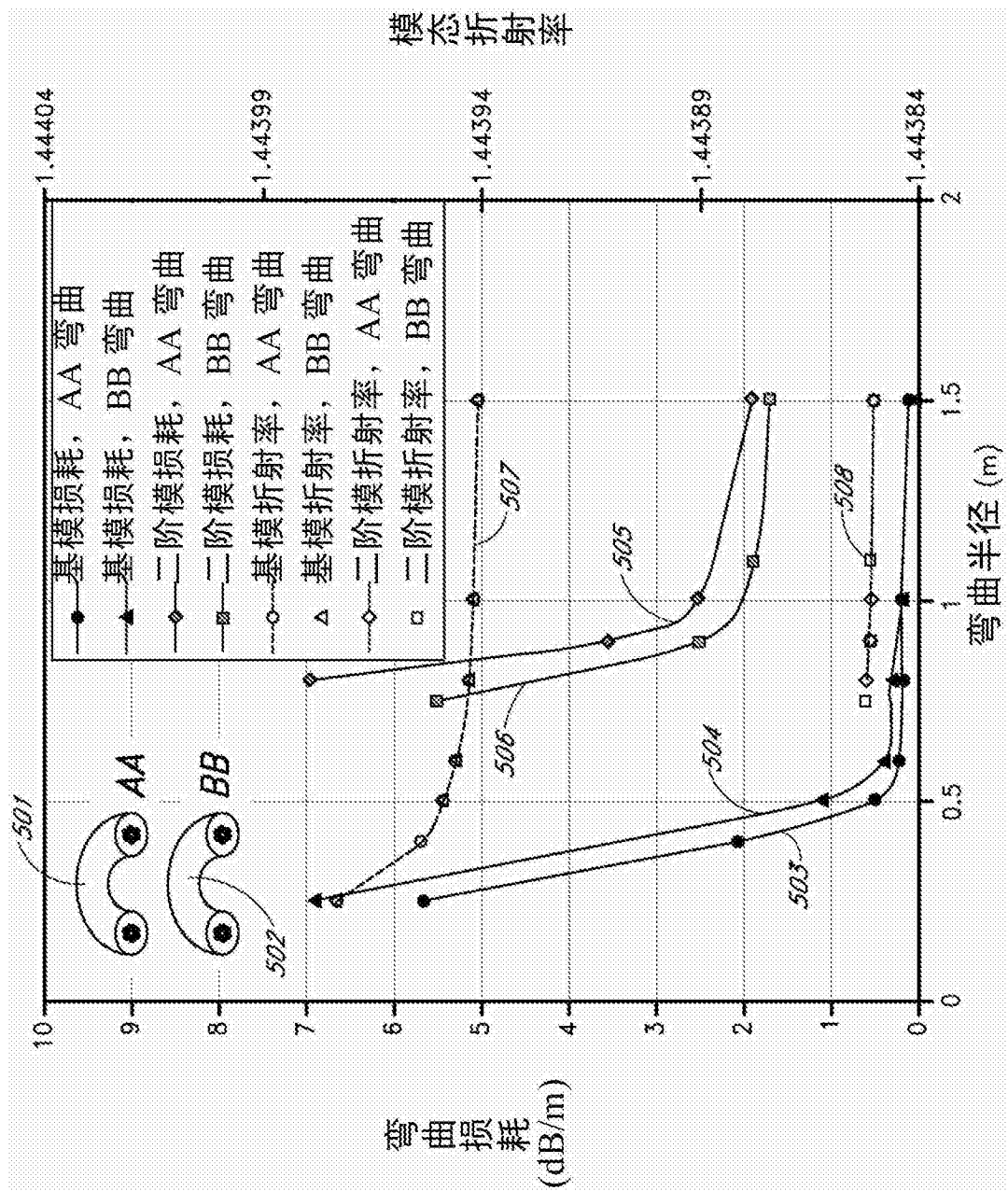


图 5

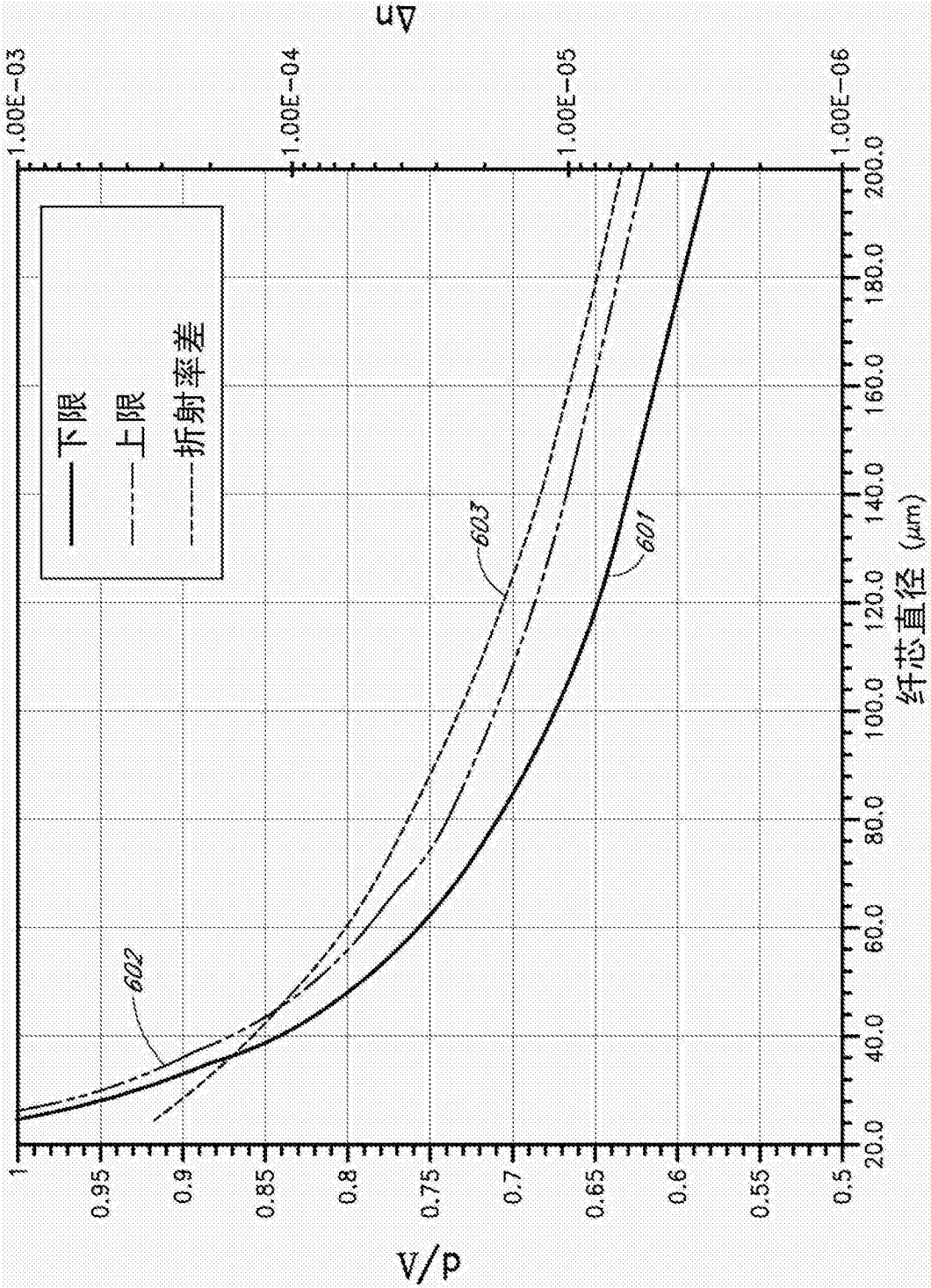


图 6

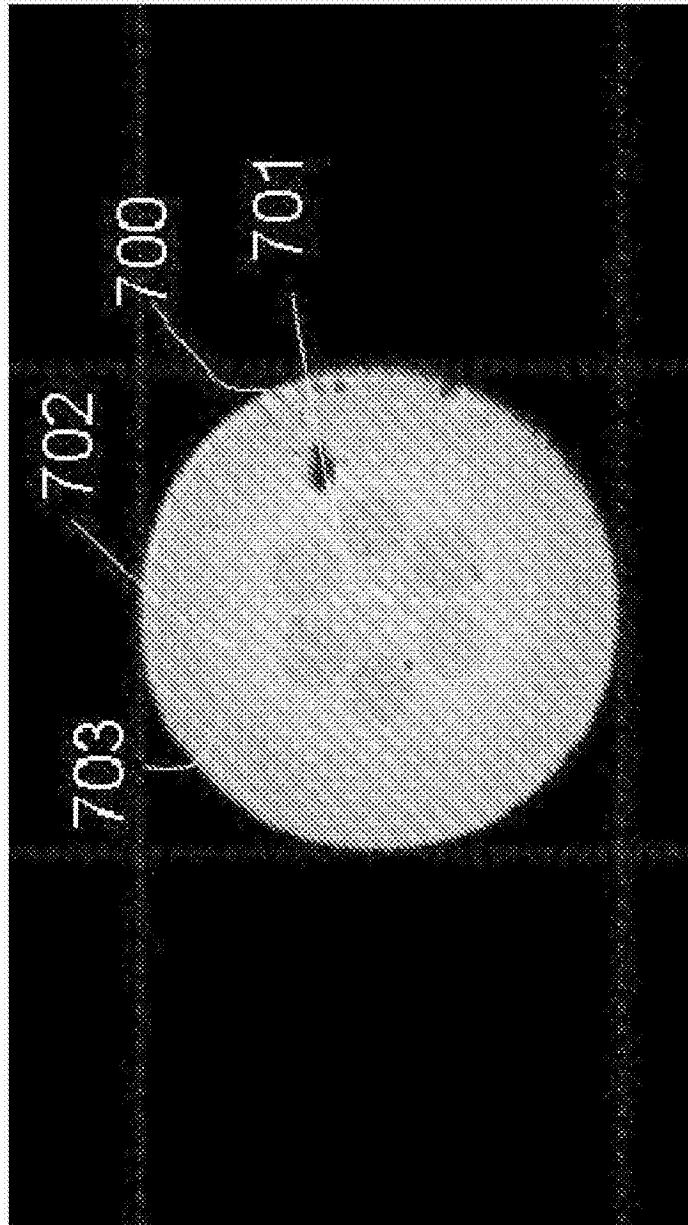


图 7

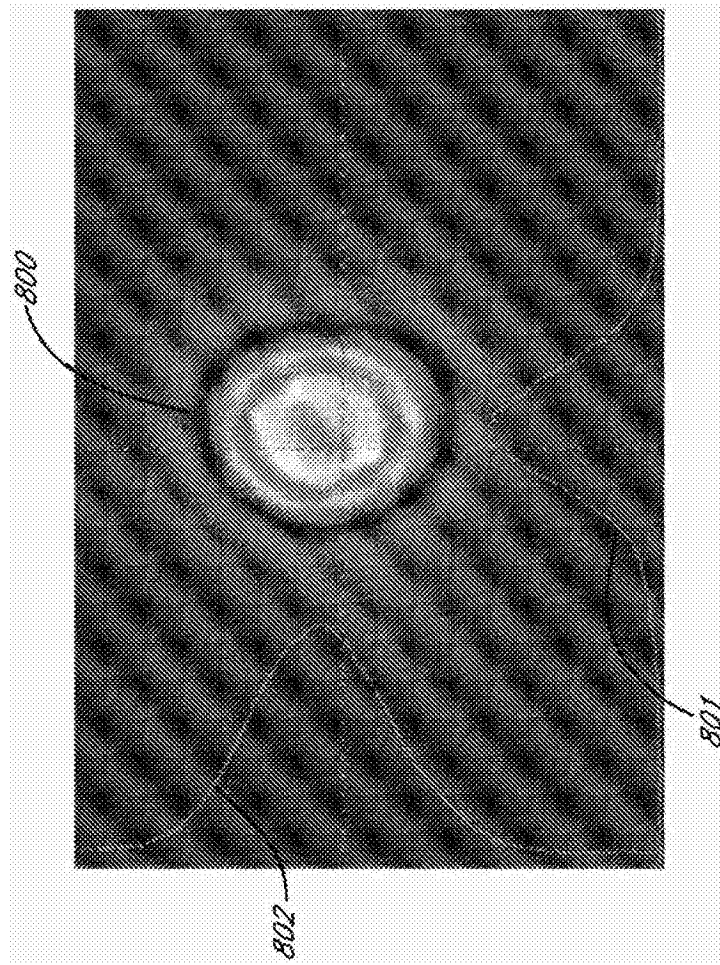


图 8

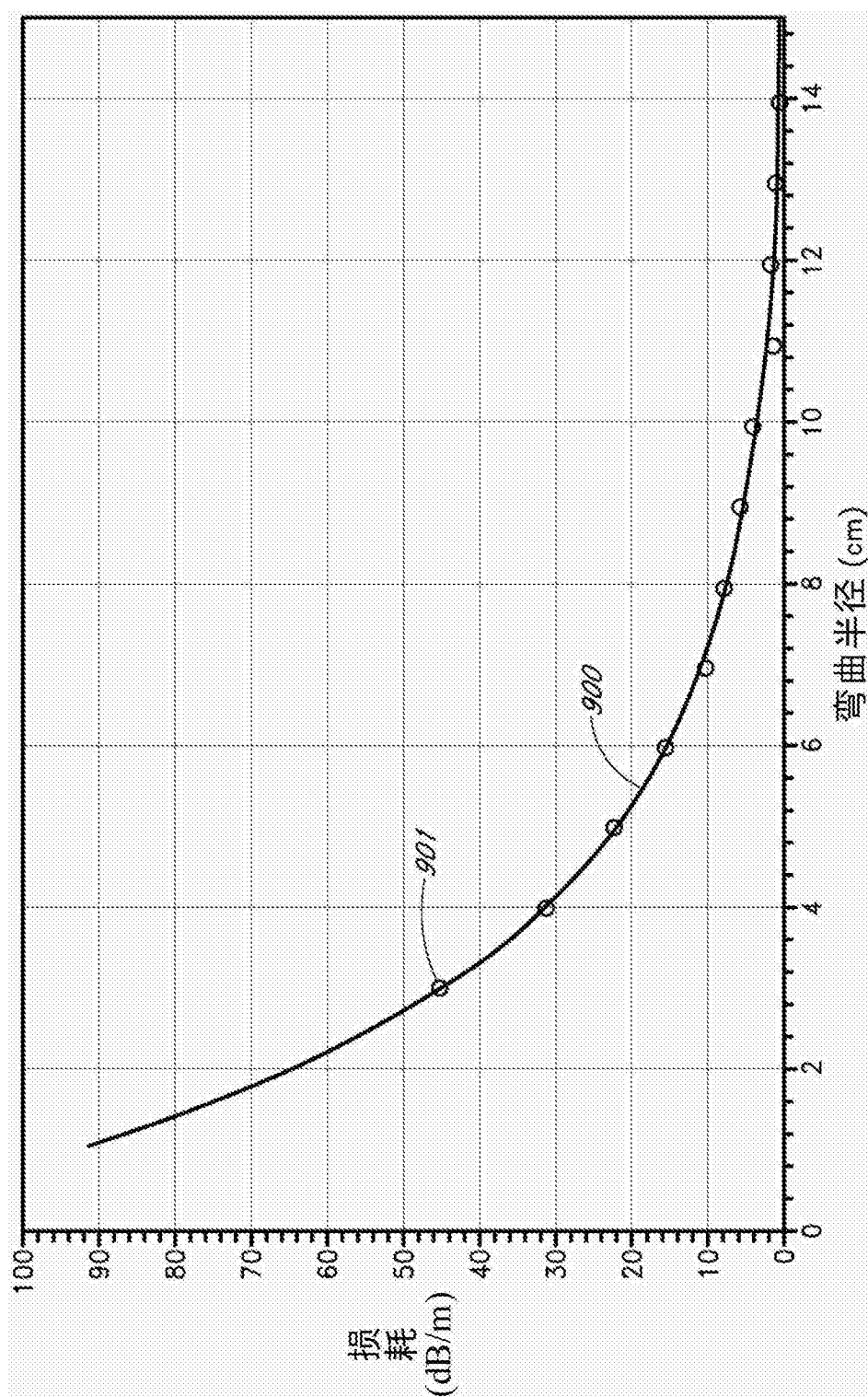


图 9

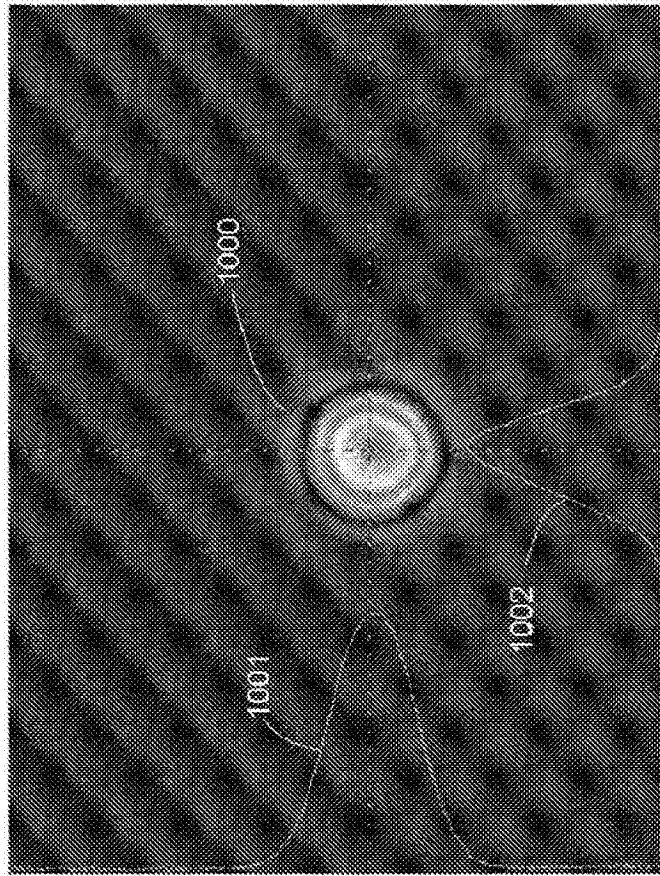


图 10

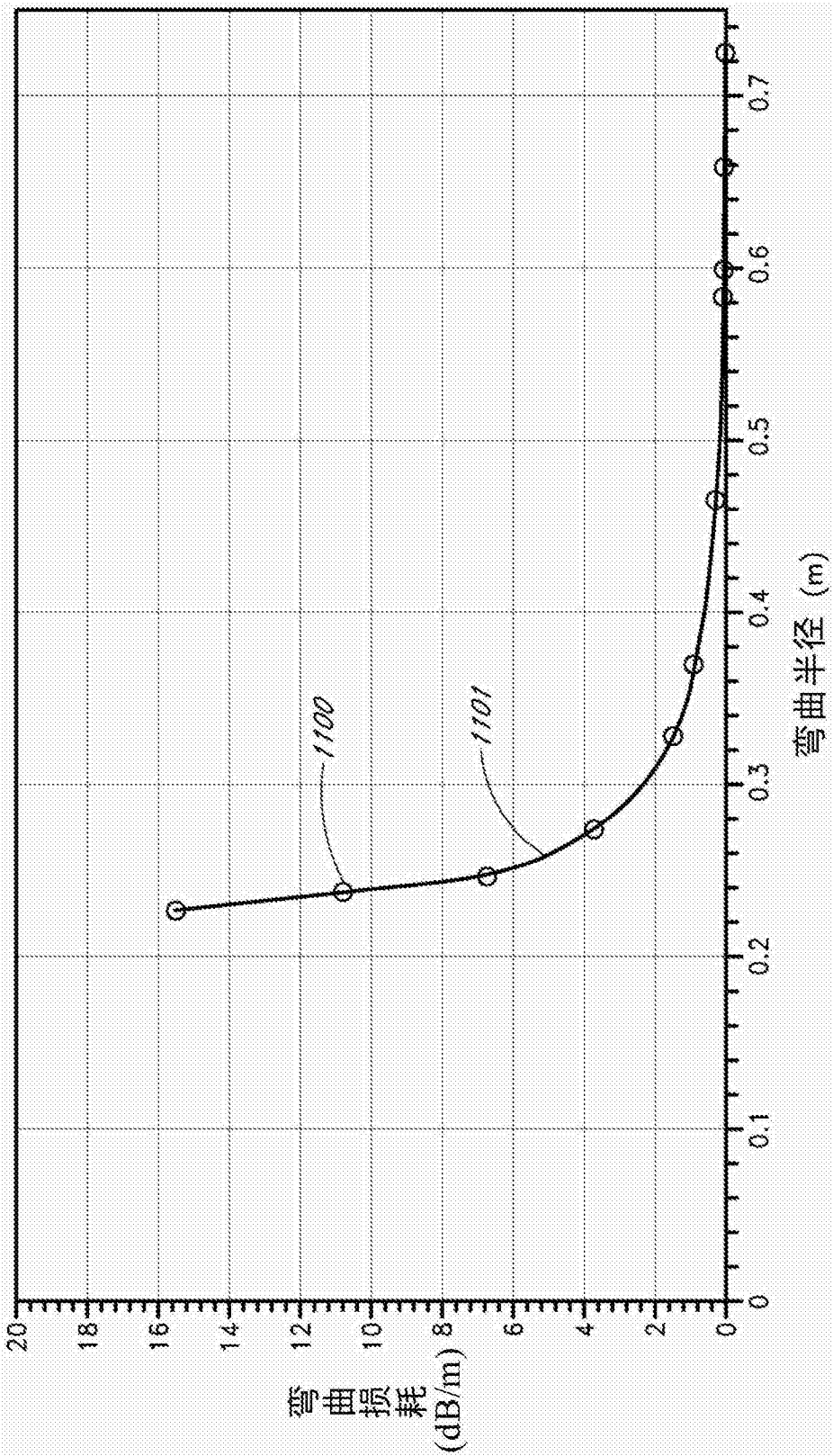


图 11

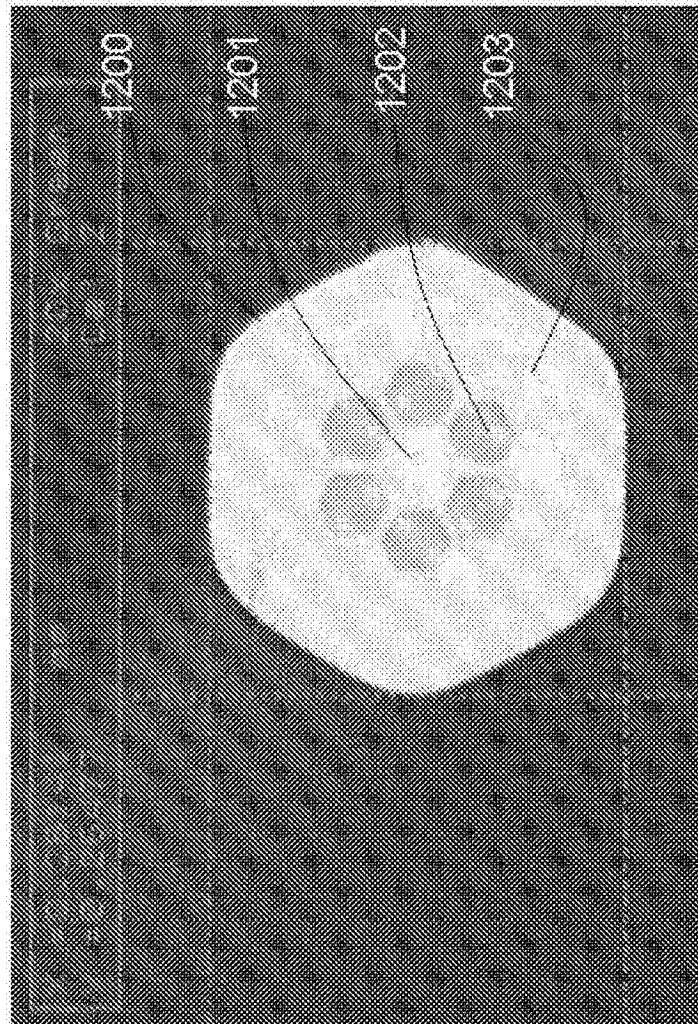


图 12

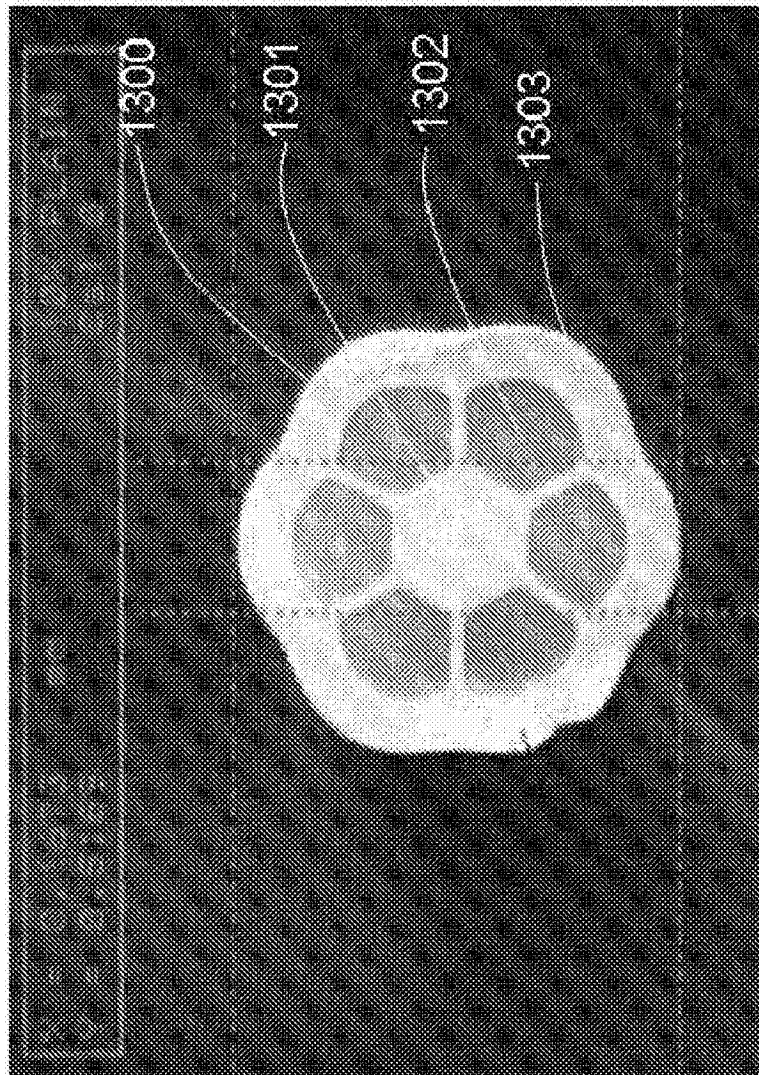


图 13A

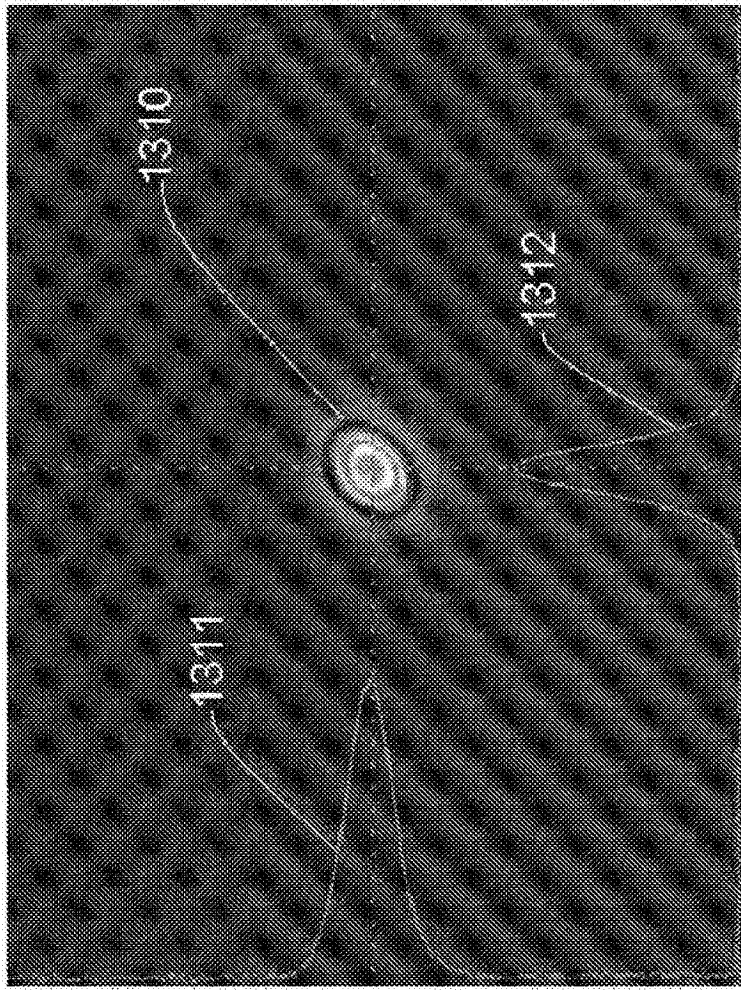


图 13B

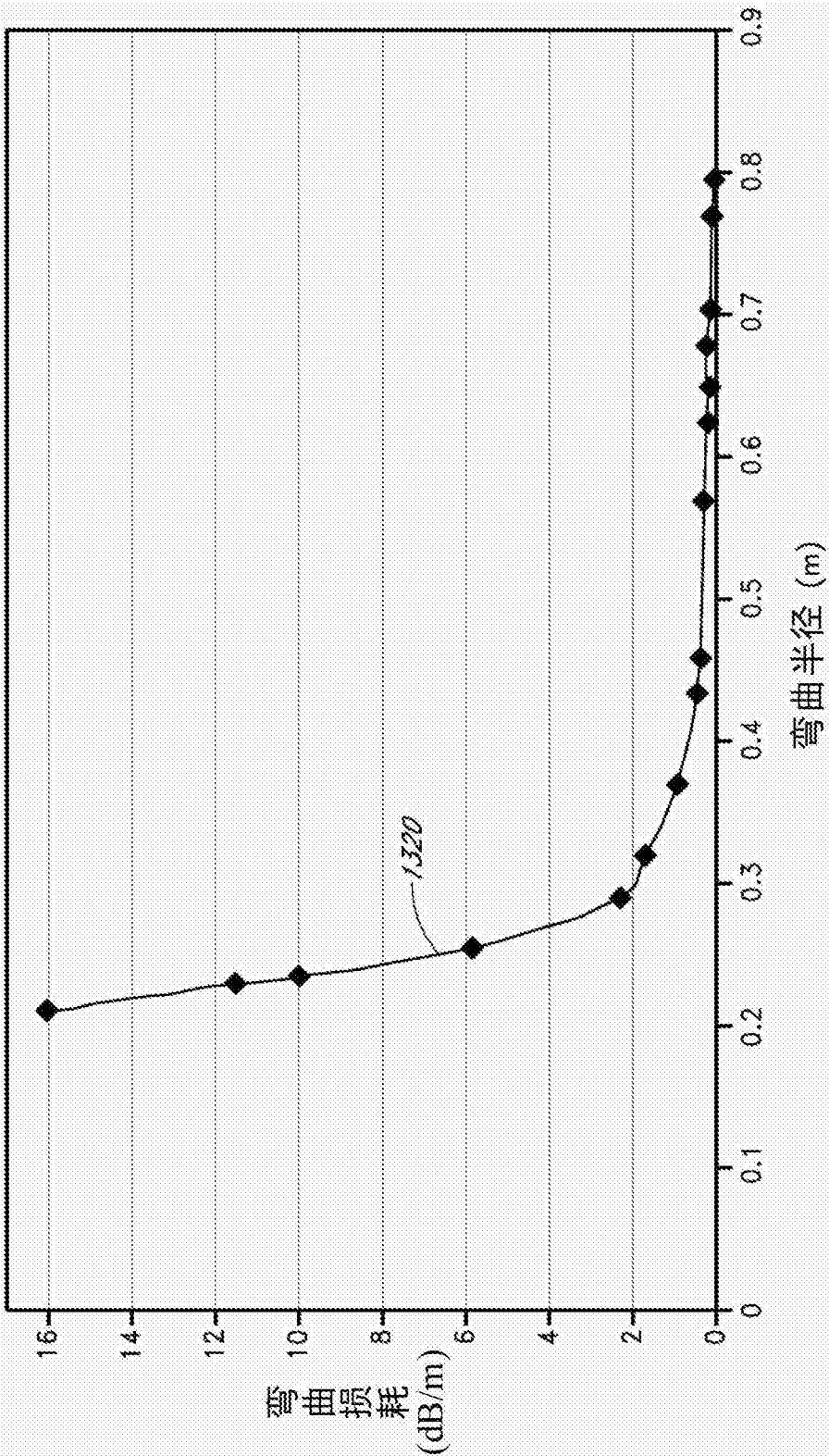


图 13C

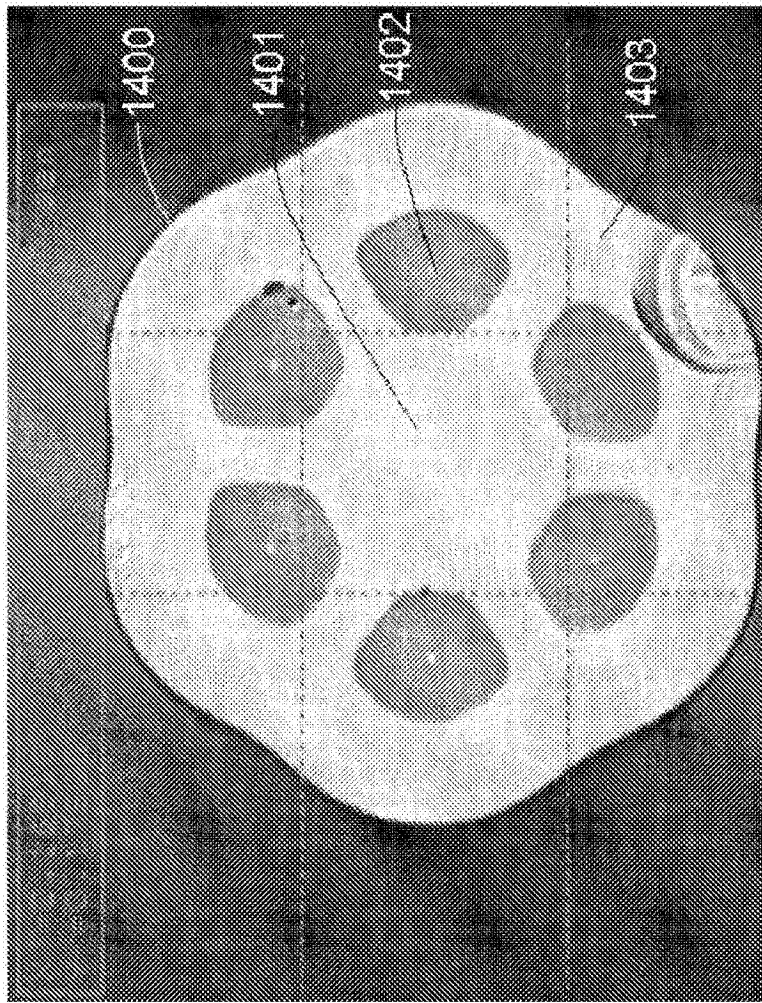


图 14A

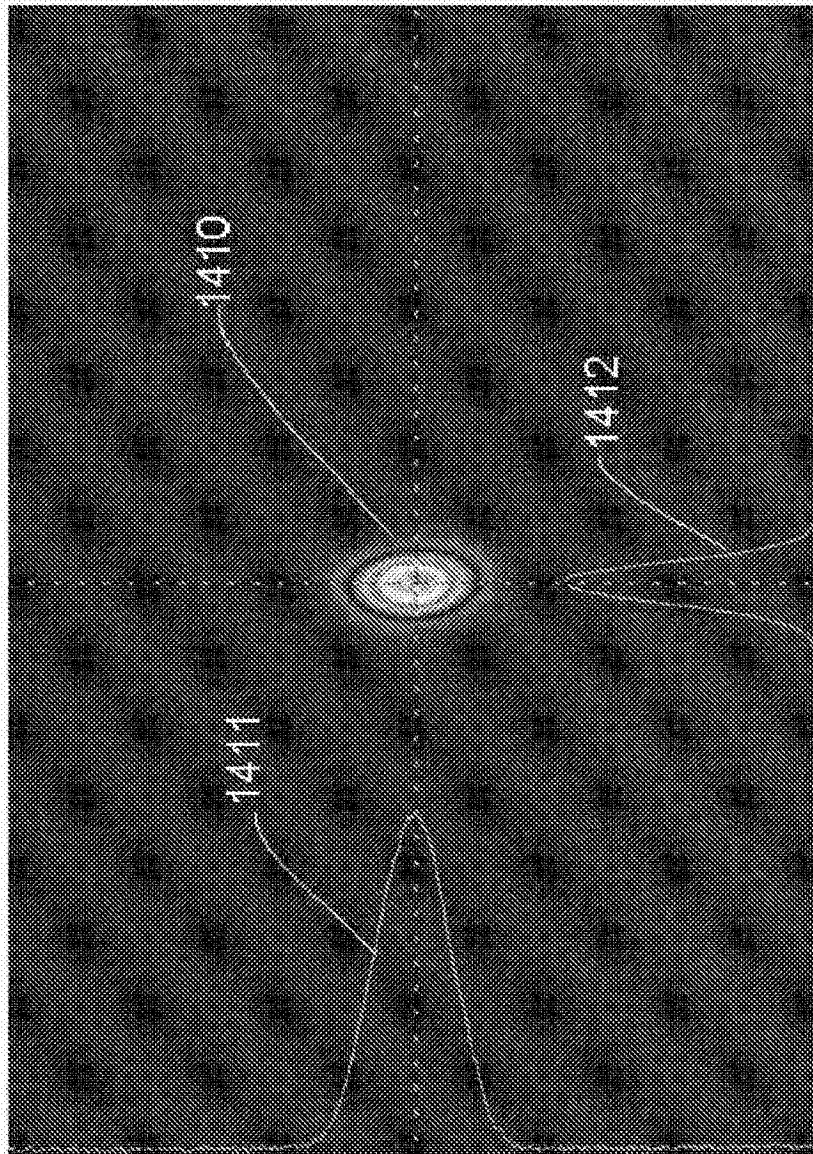


图 14B

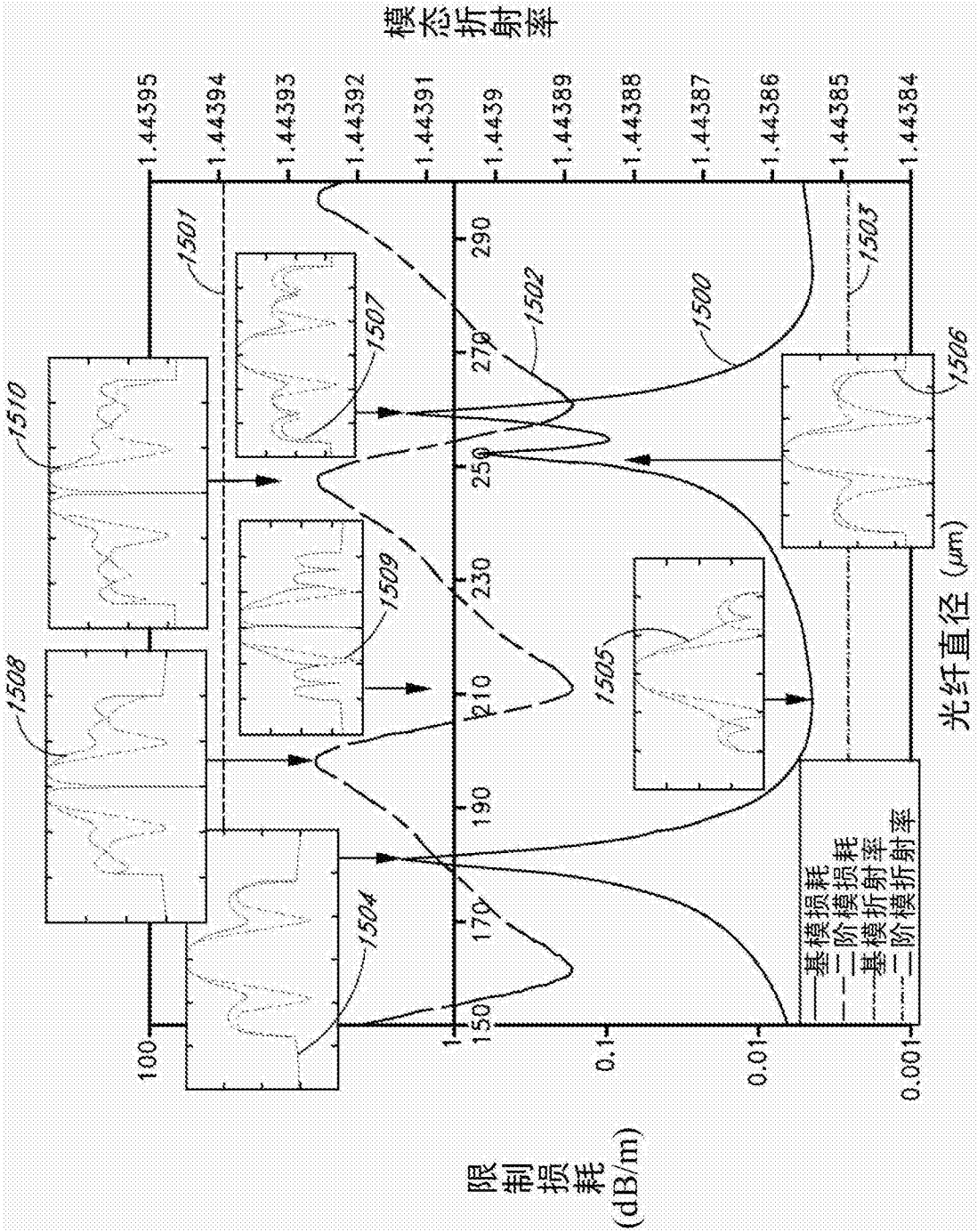


图 15

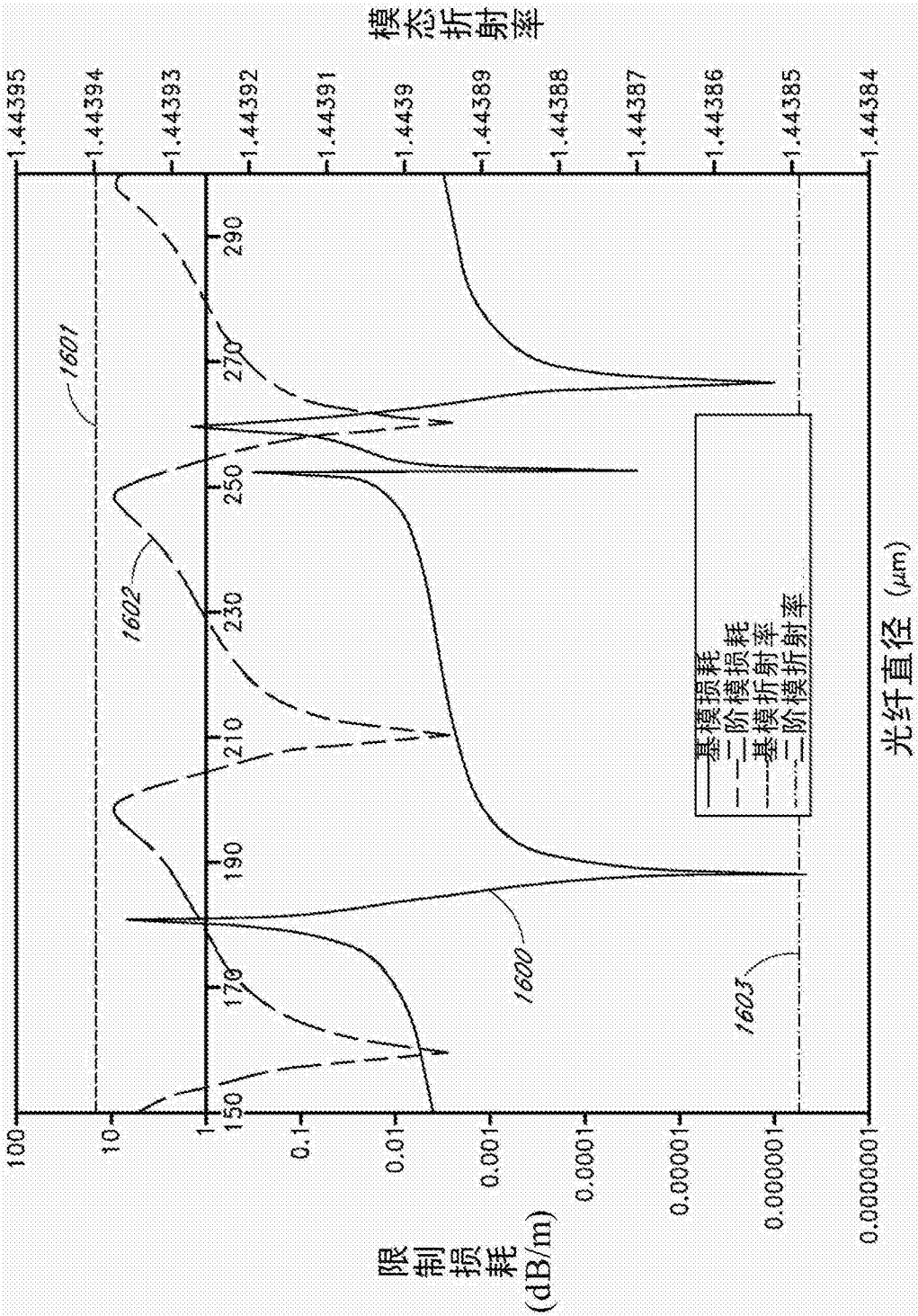


图 16

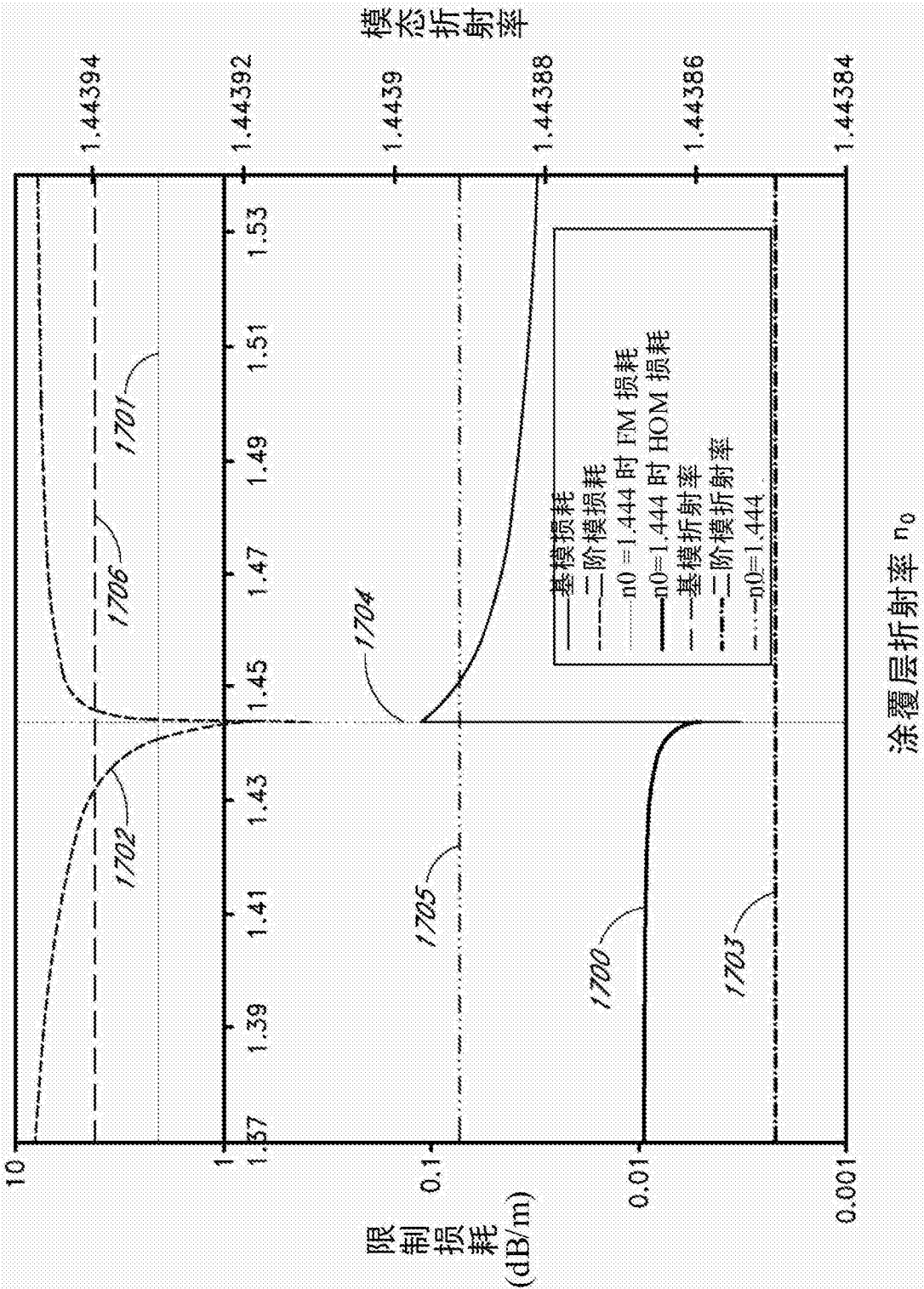


图 17

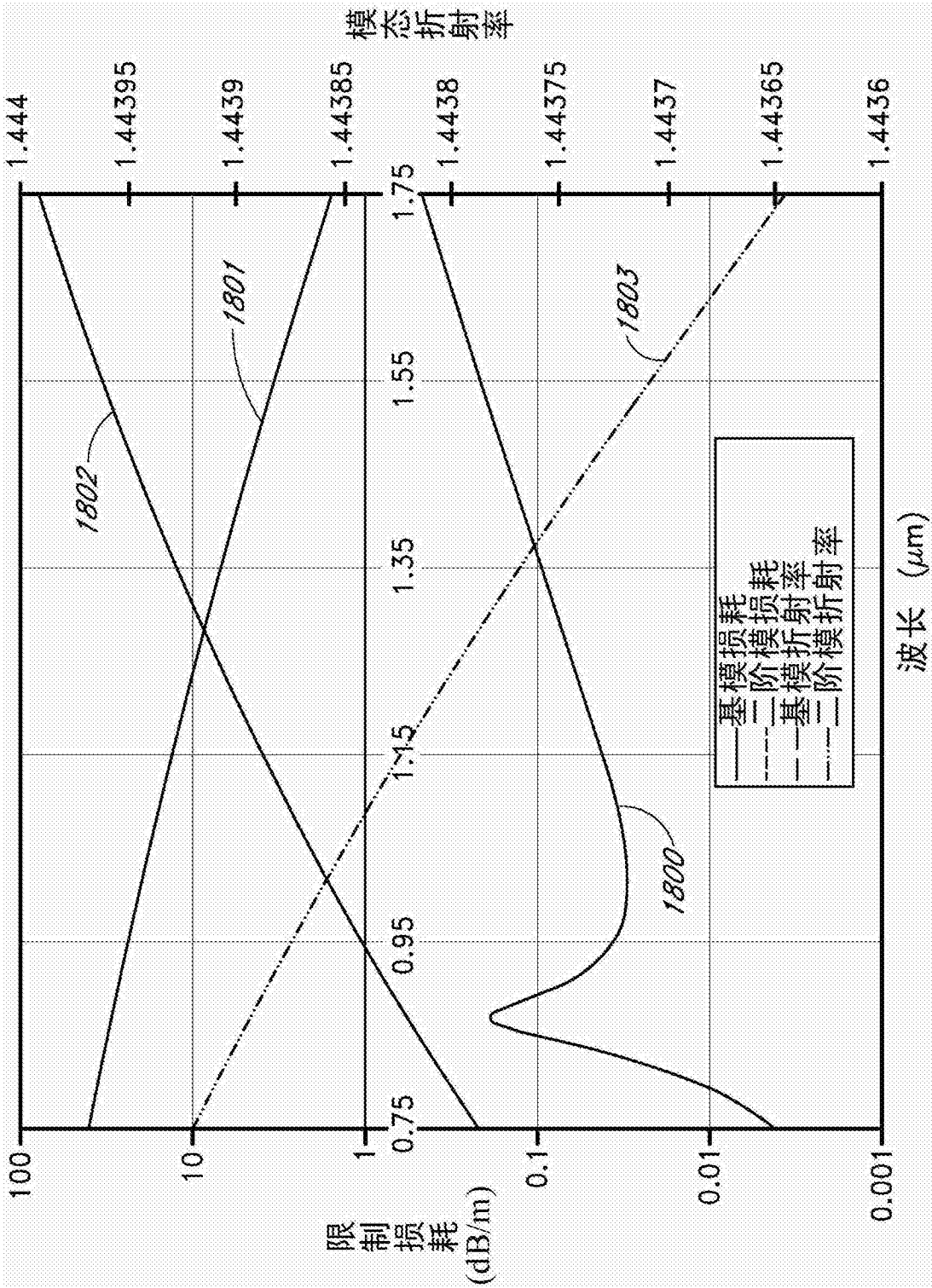


图 18

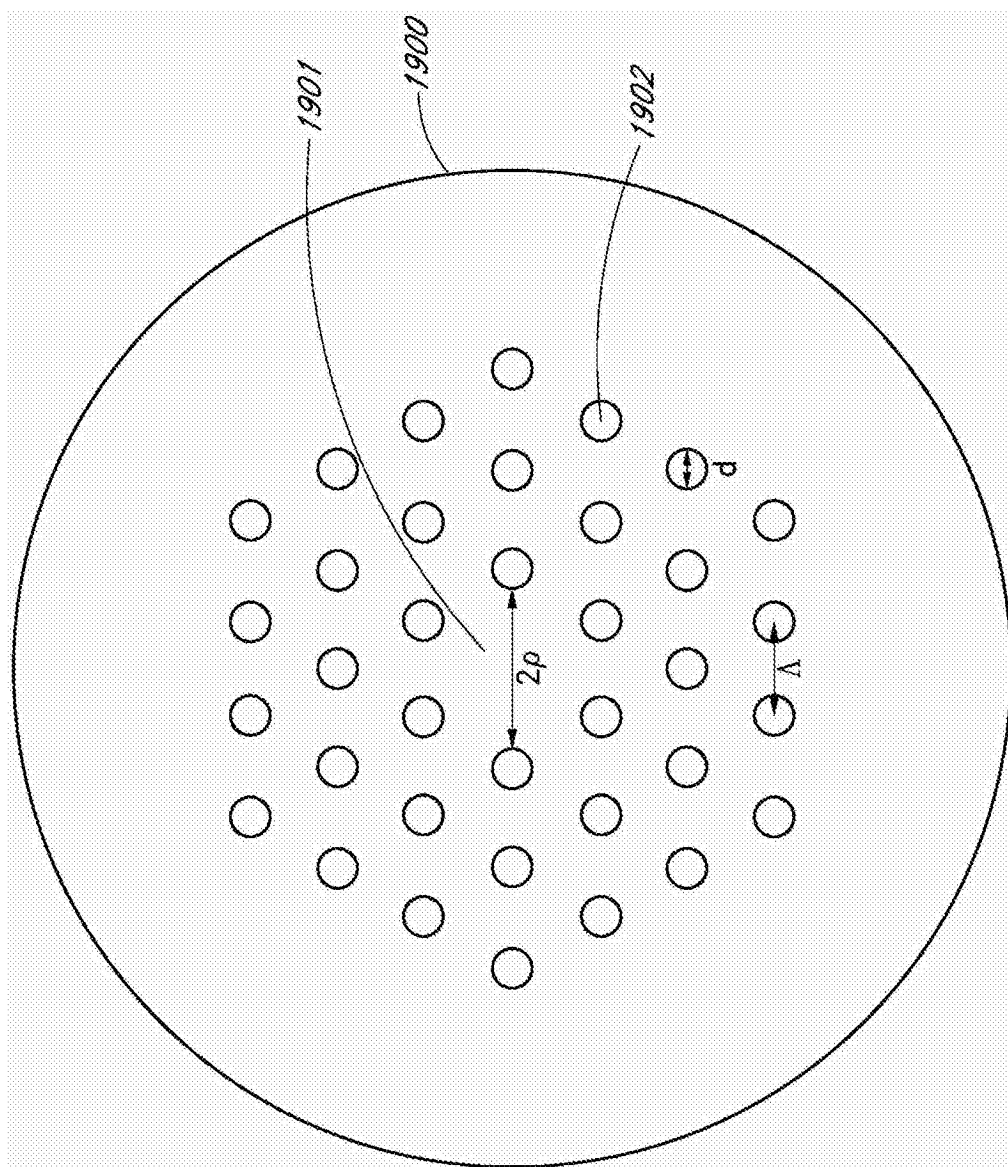


图 19

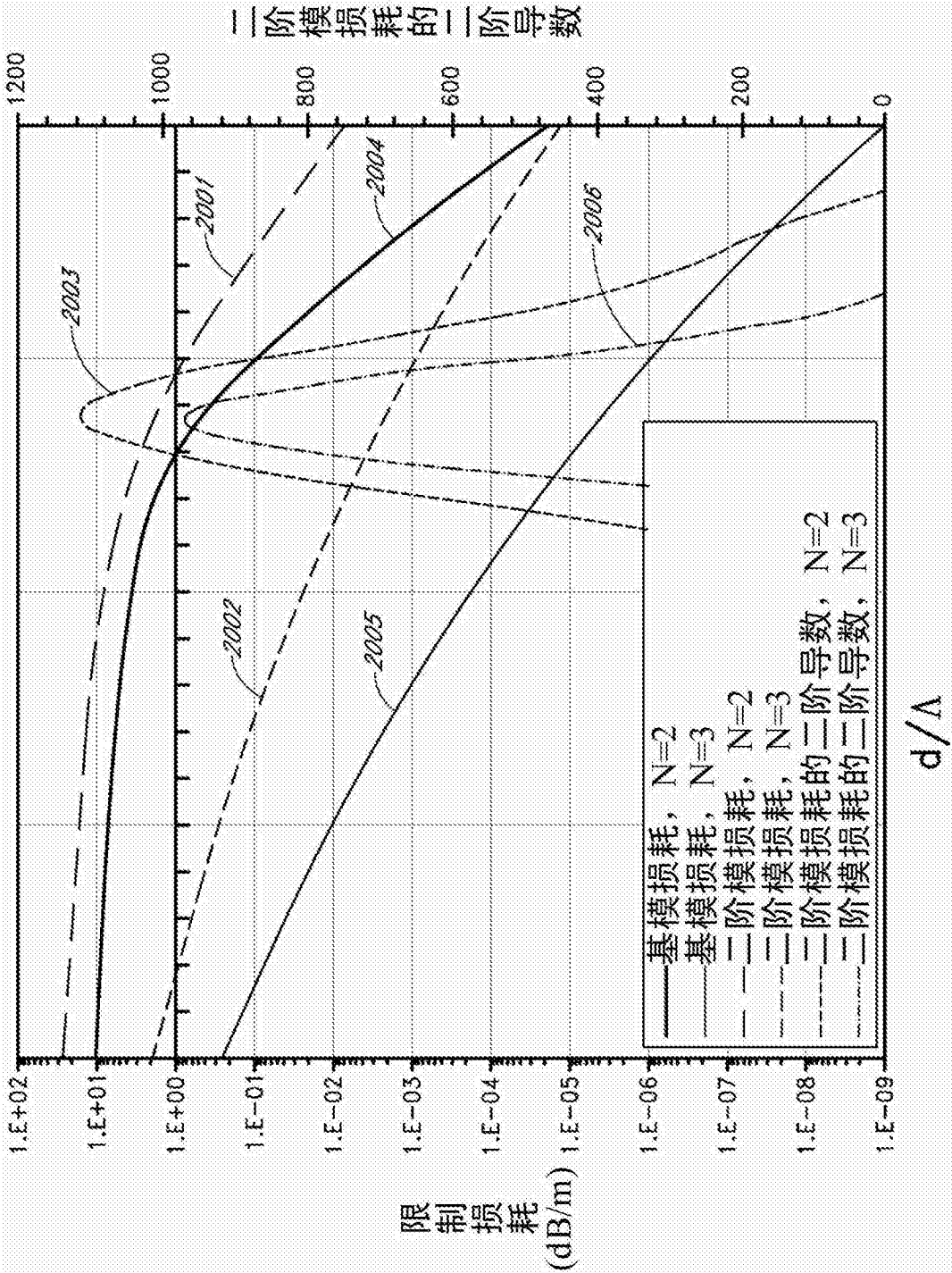


图 20

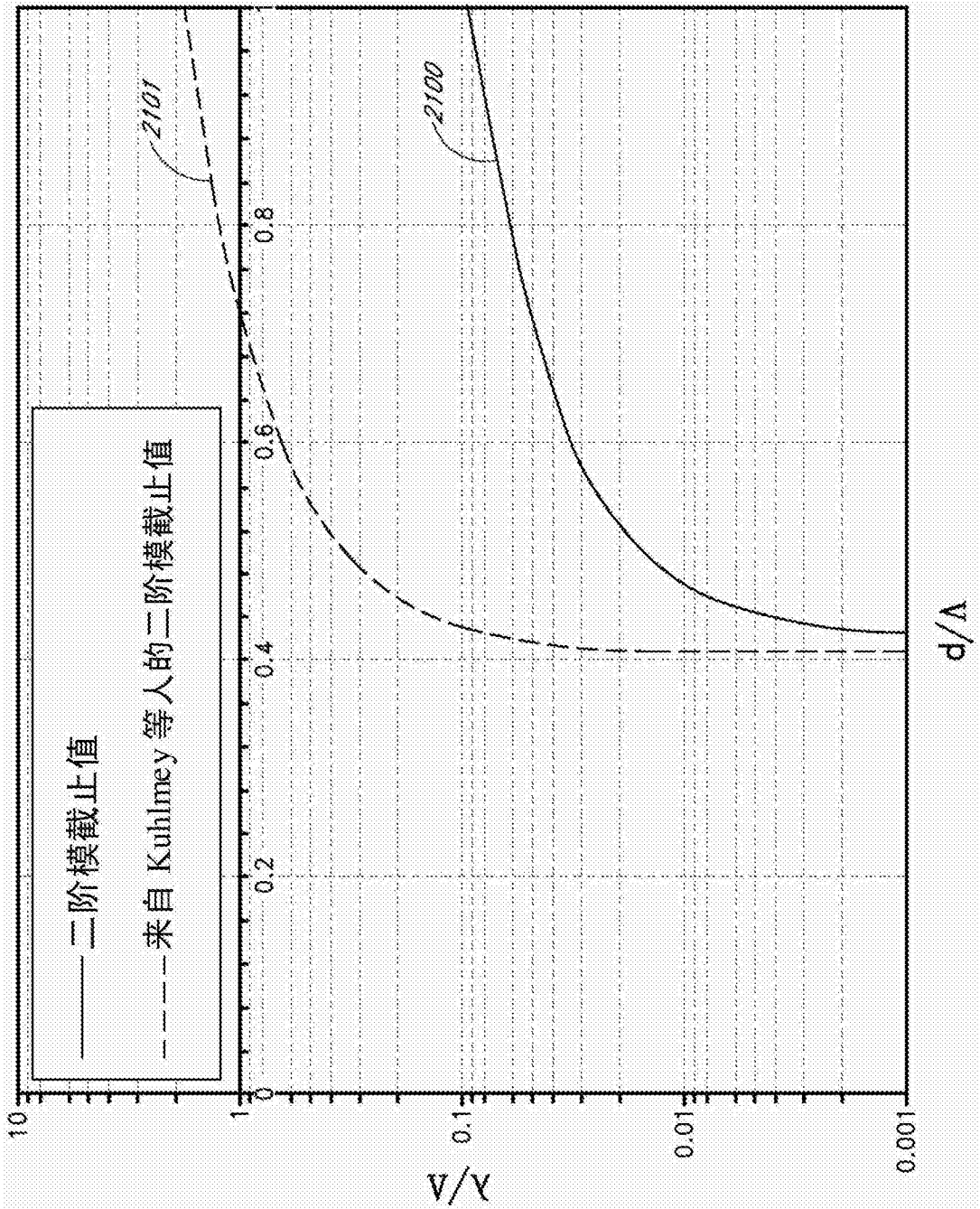


图 21

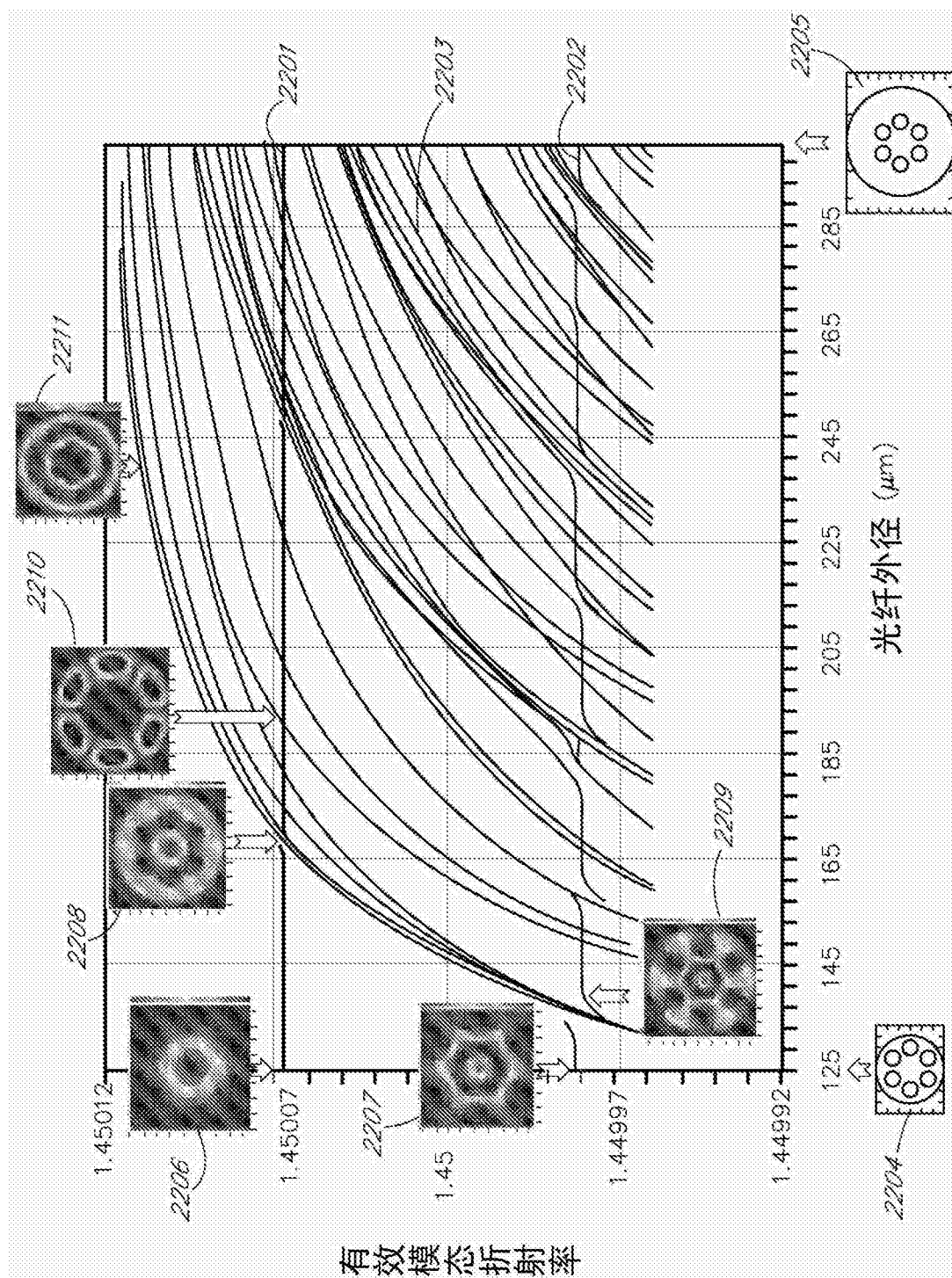


图 22

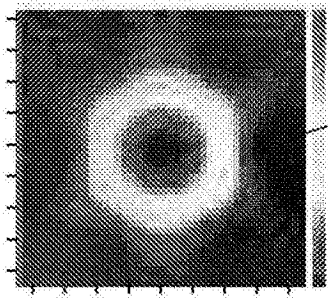


图 22A

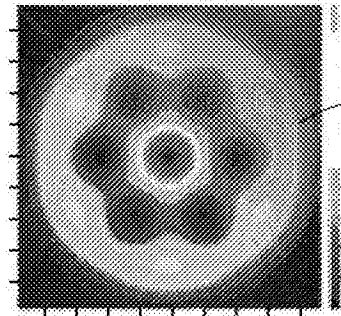


图 22B

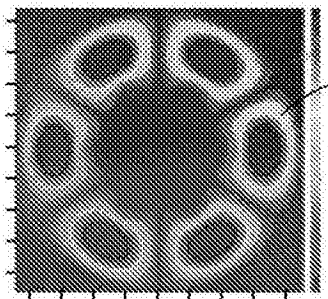


图 22C

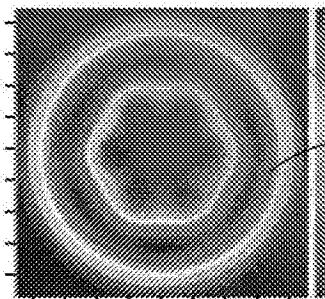


图 22D

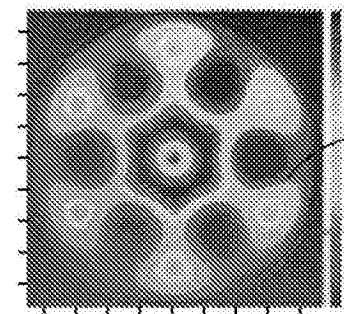


图 22E

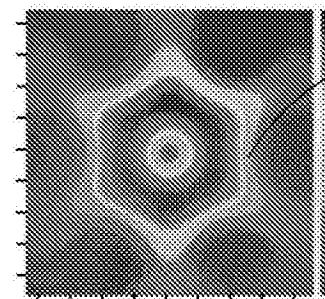


图 22F

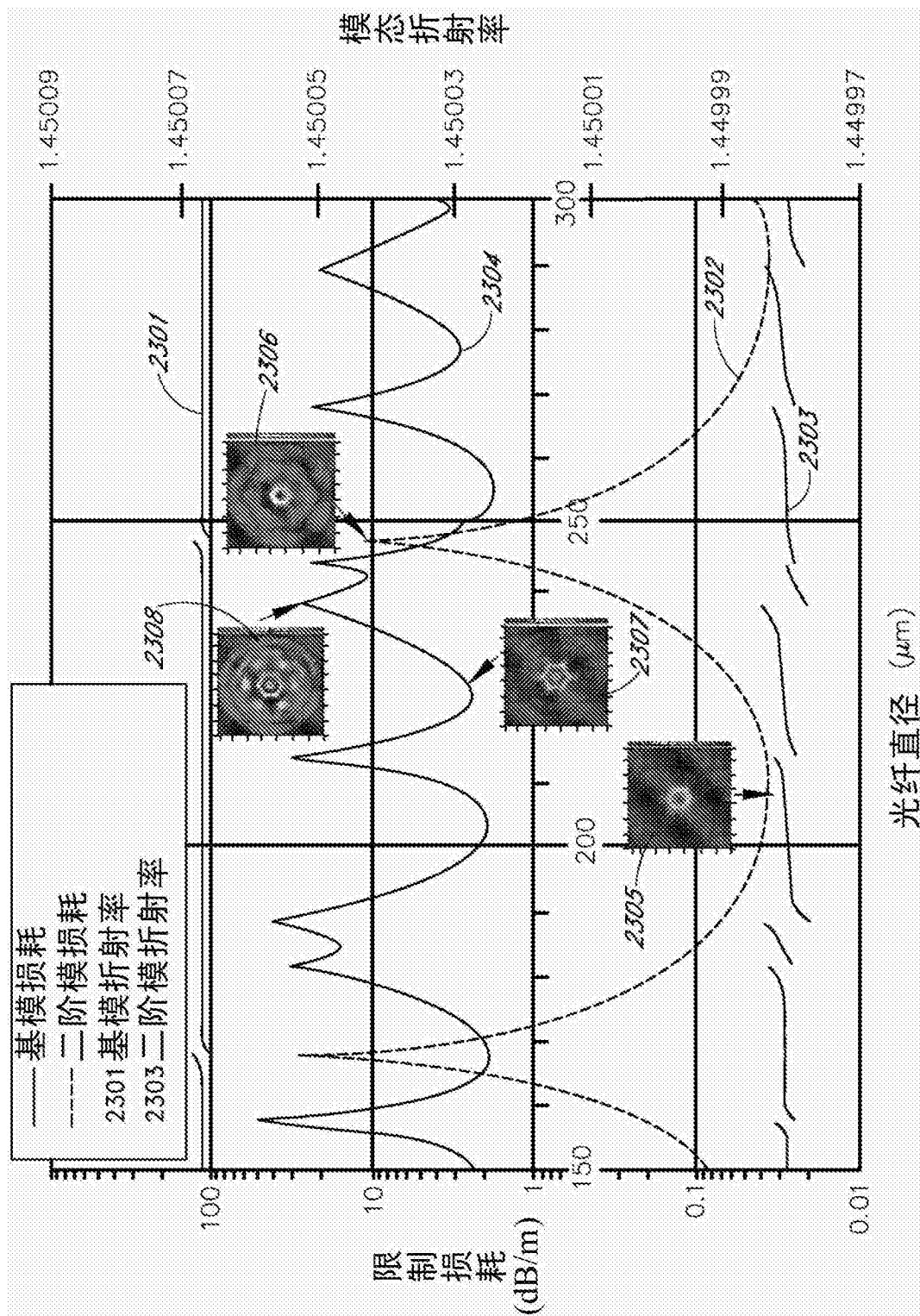


图 23

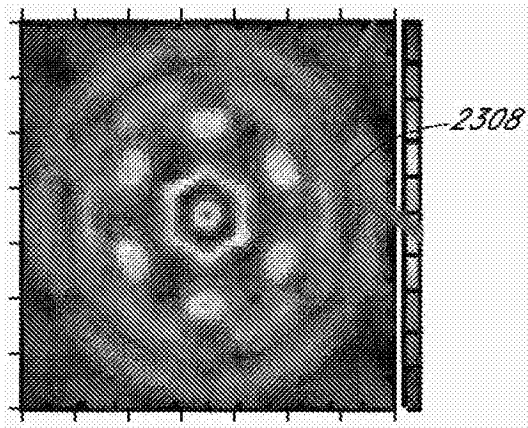


图 23A

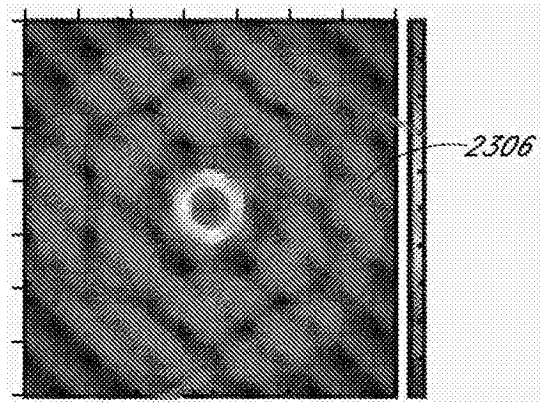


图 23B

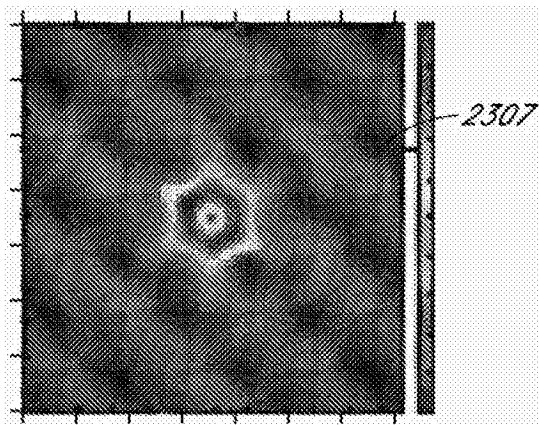


图 23C

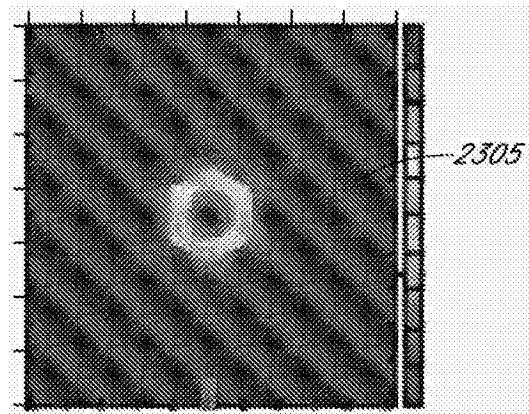


图 23D

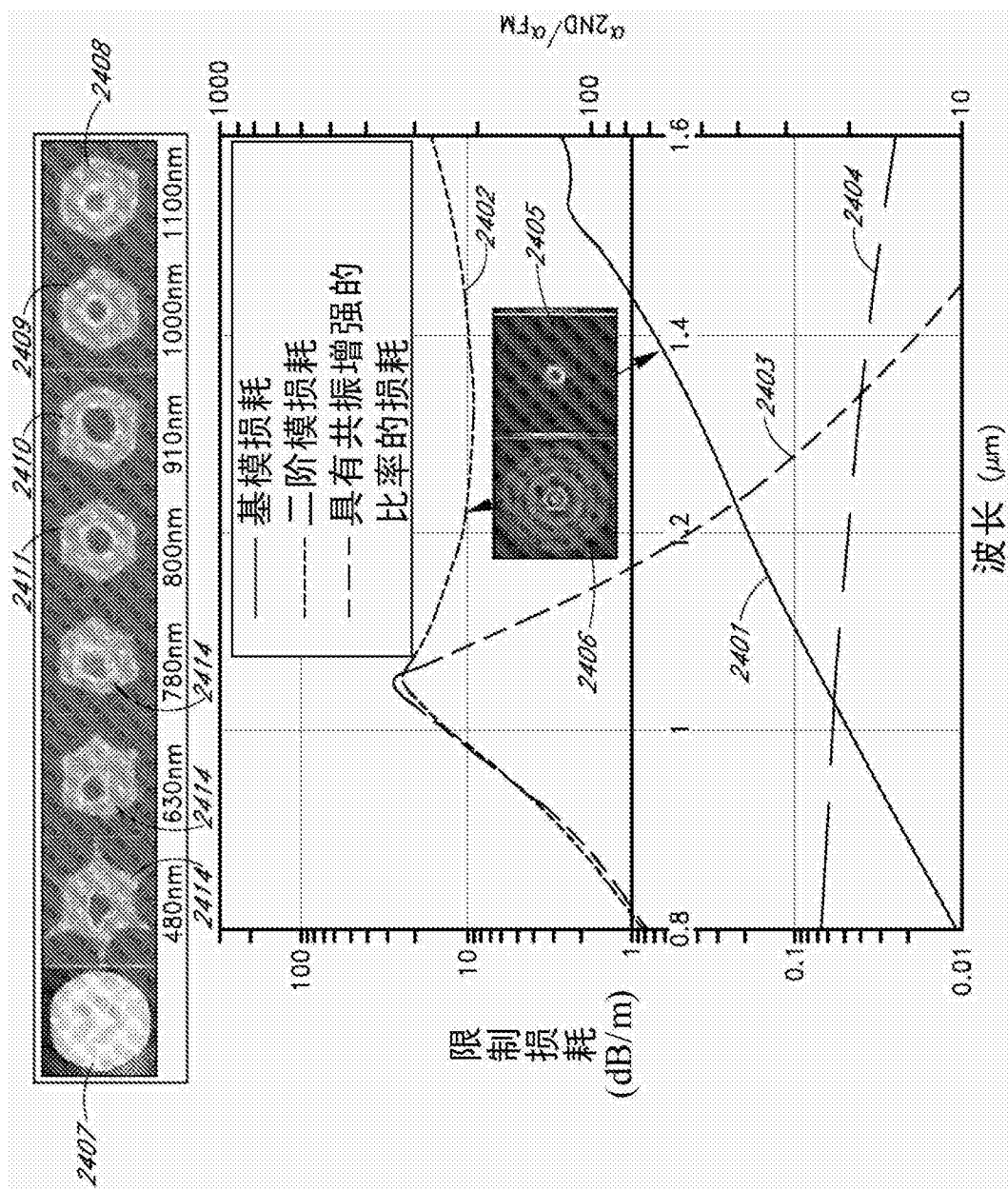


图 24

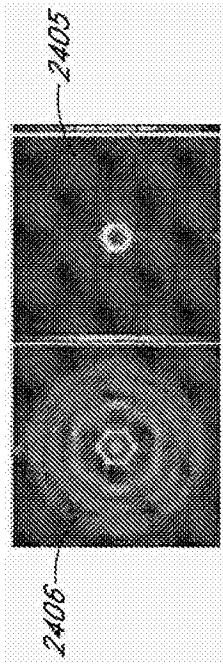


图 24A

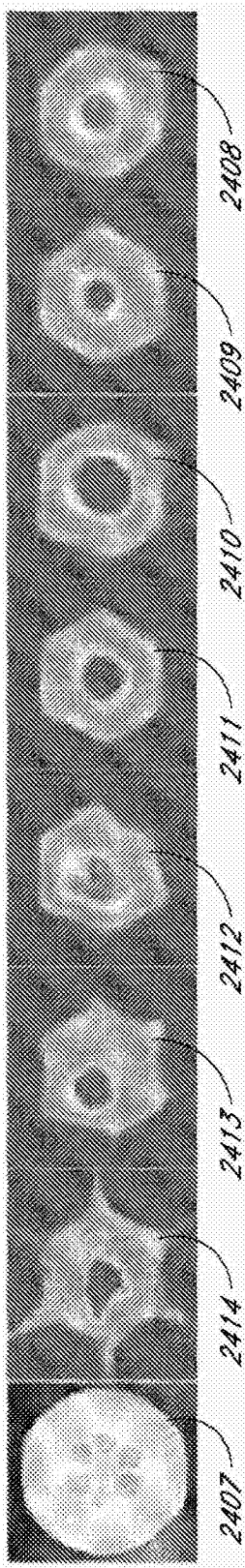


图 24B

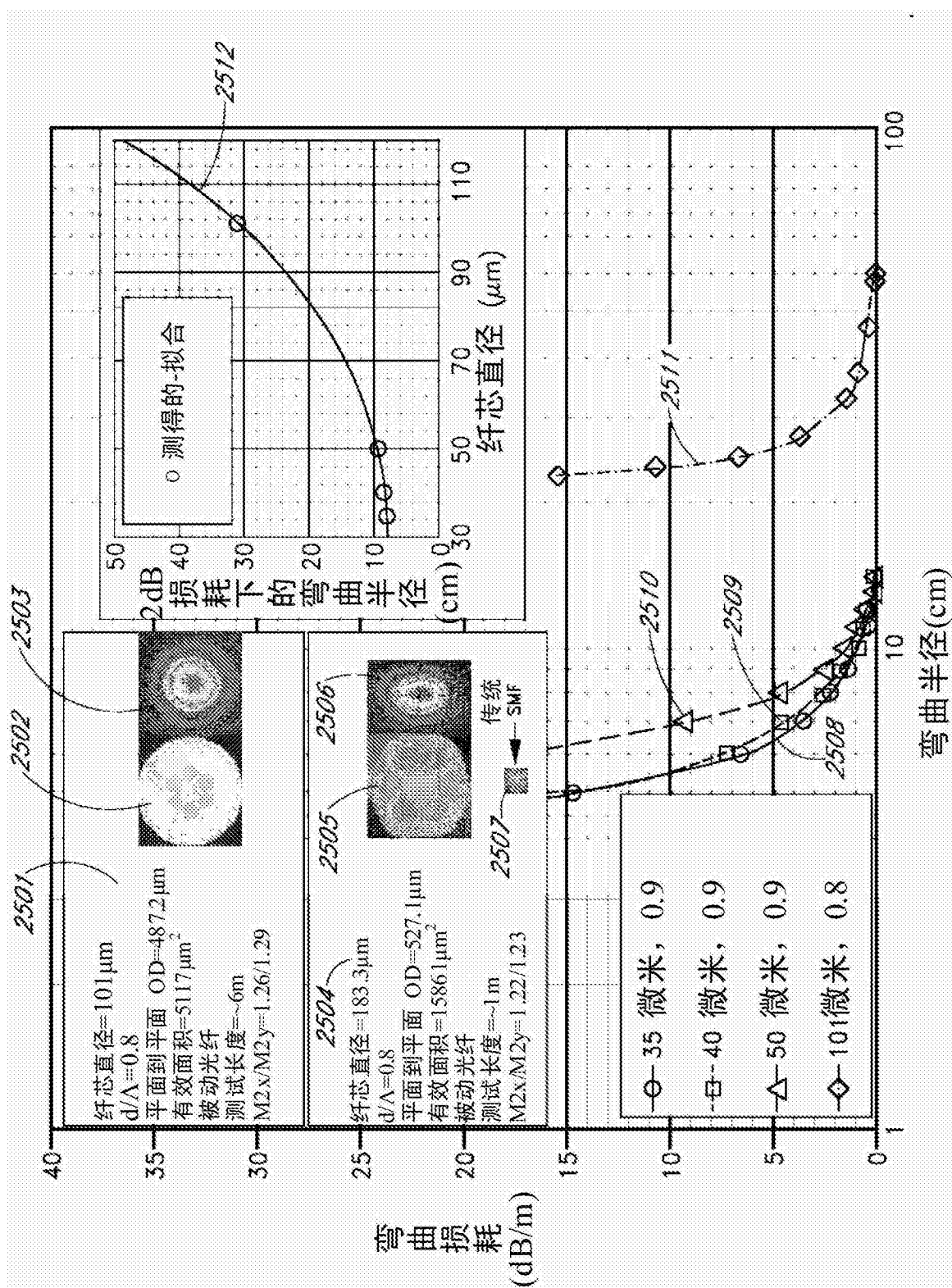


图 25

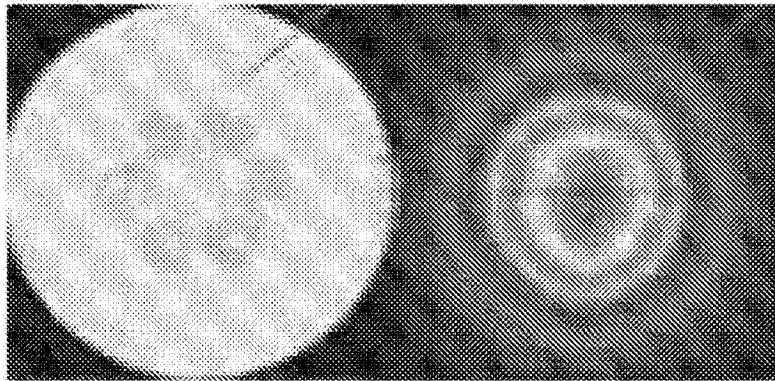


图 25A

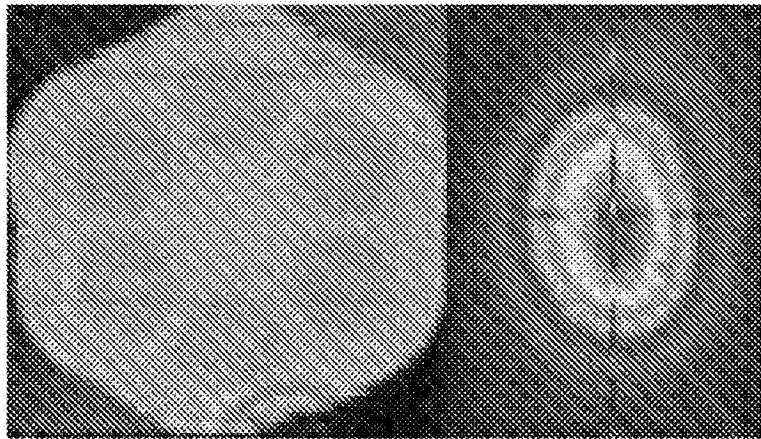


图 25B

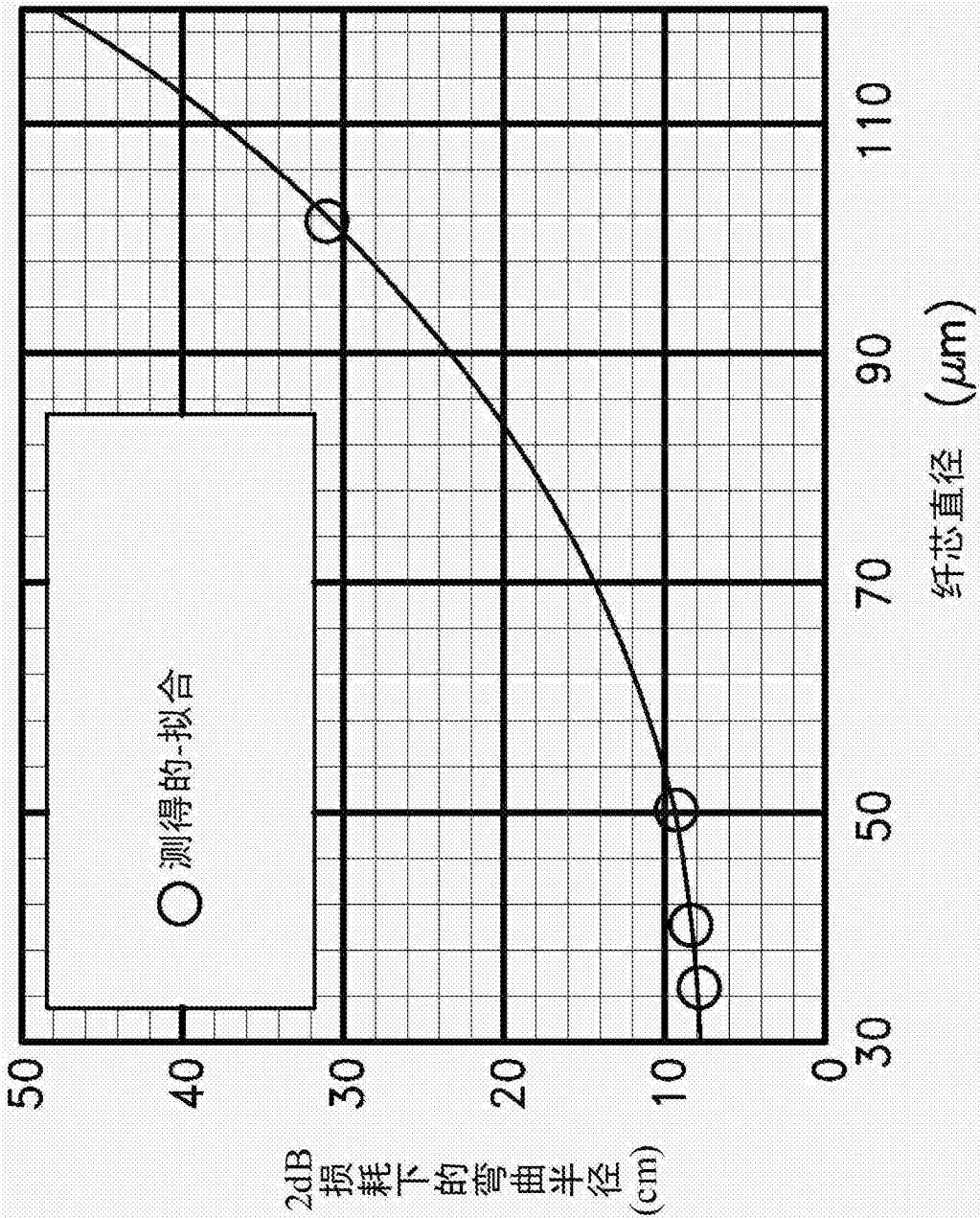


图 25C

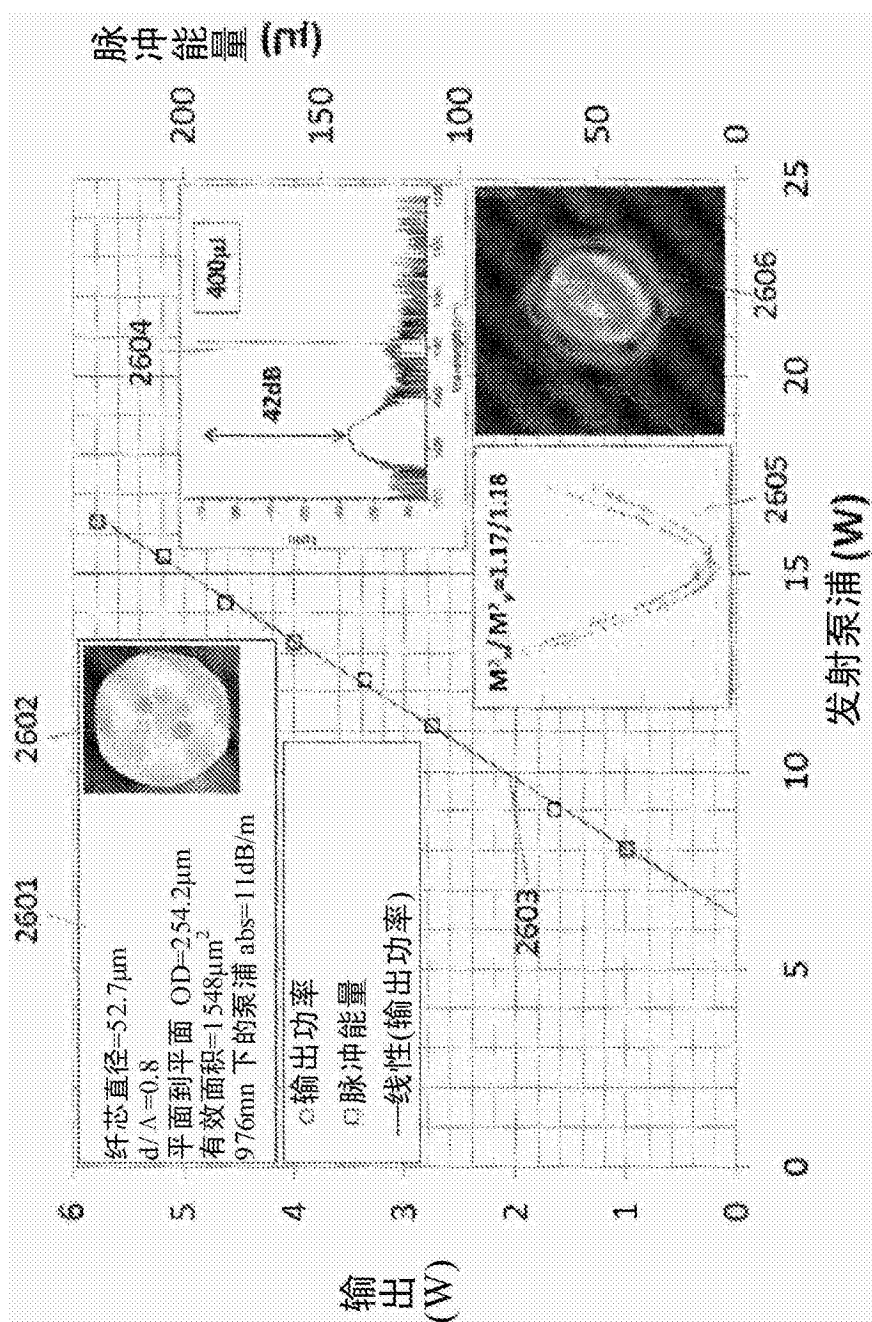


图 26

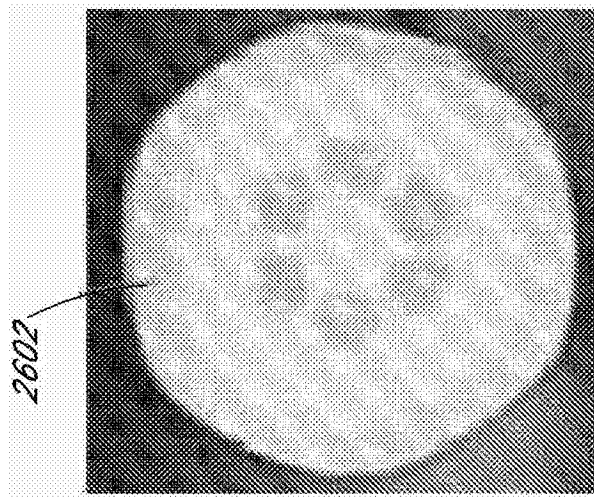


图 26A

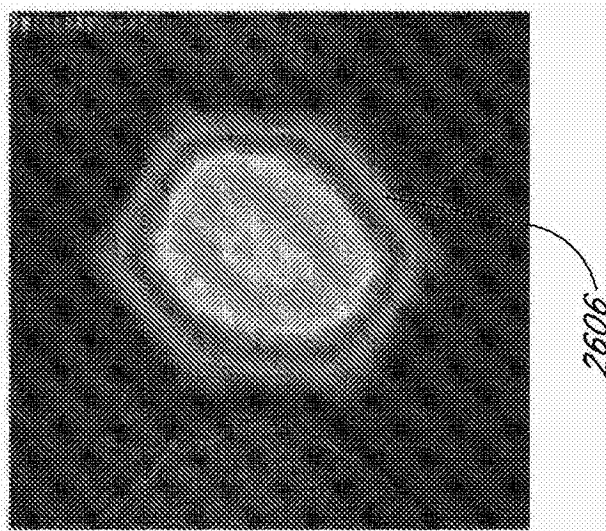


图 26B

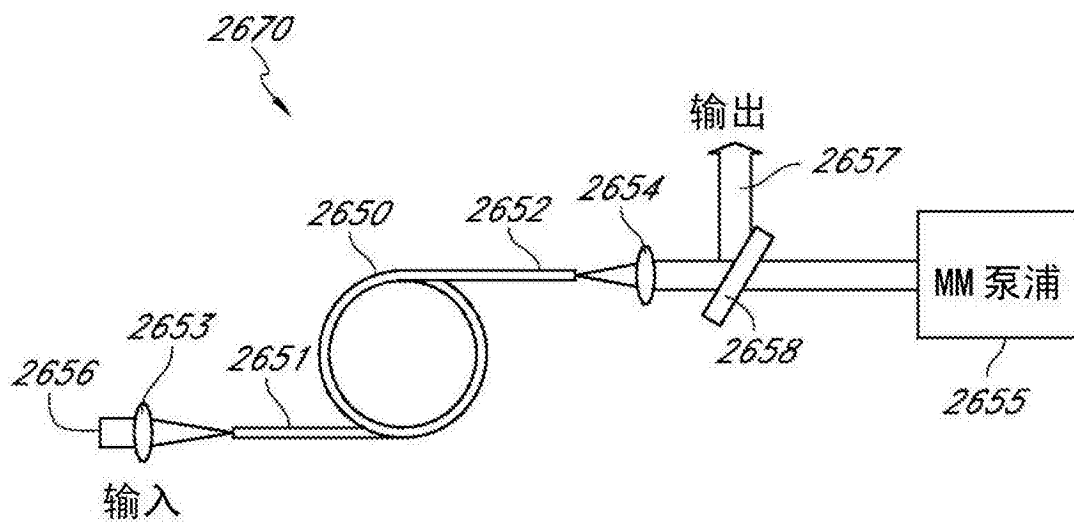


图 26C

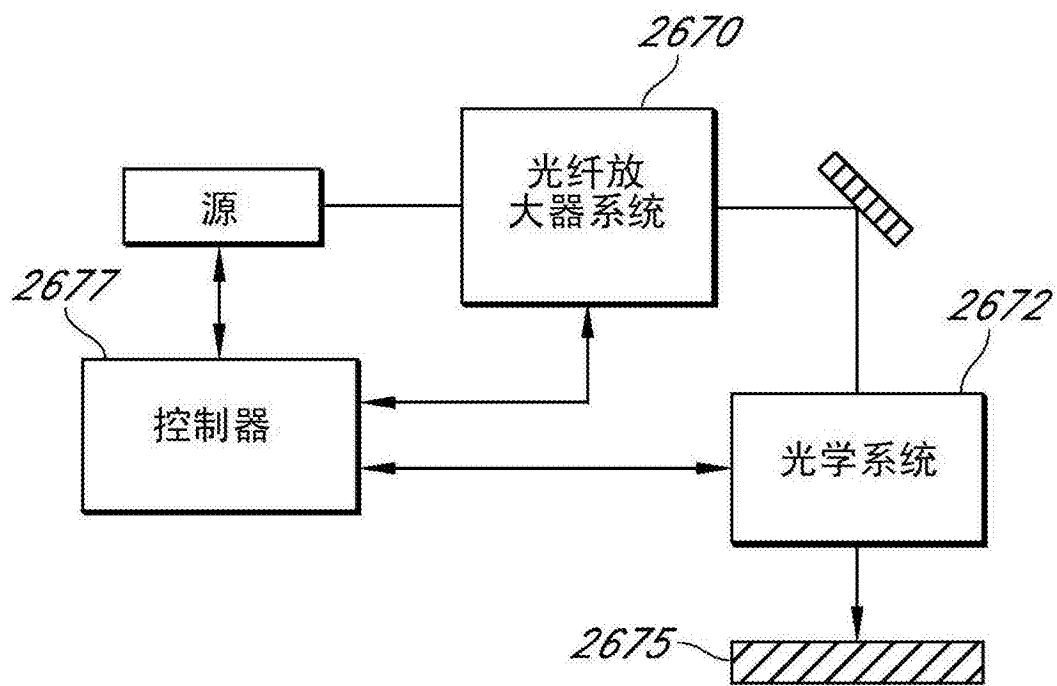


图 26D

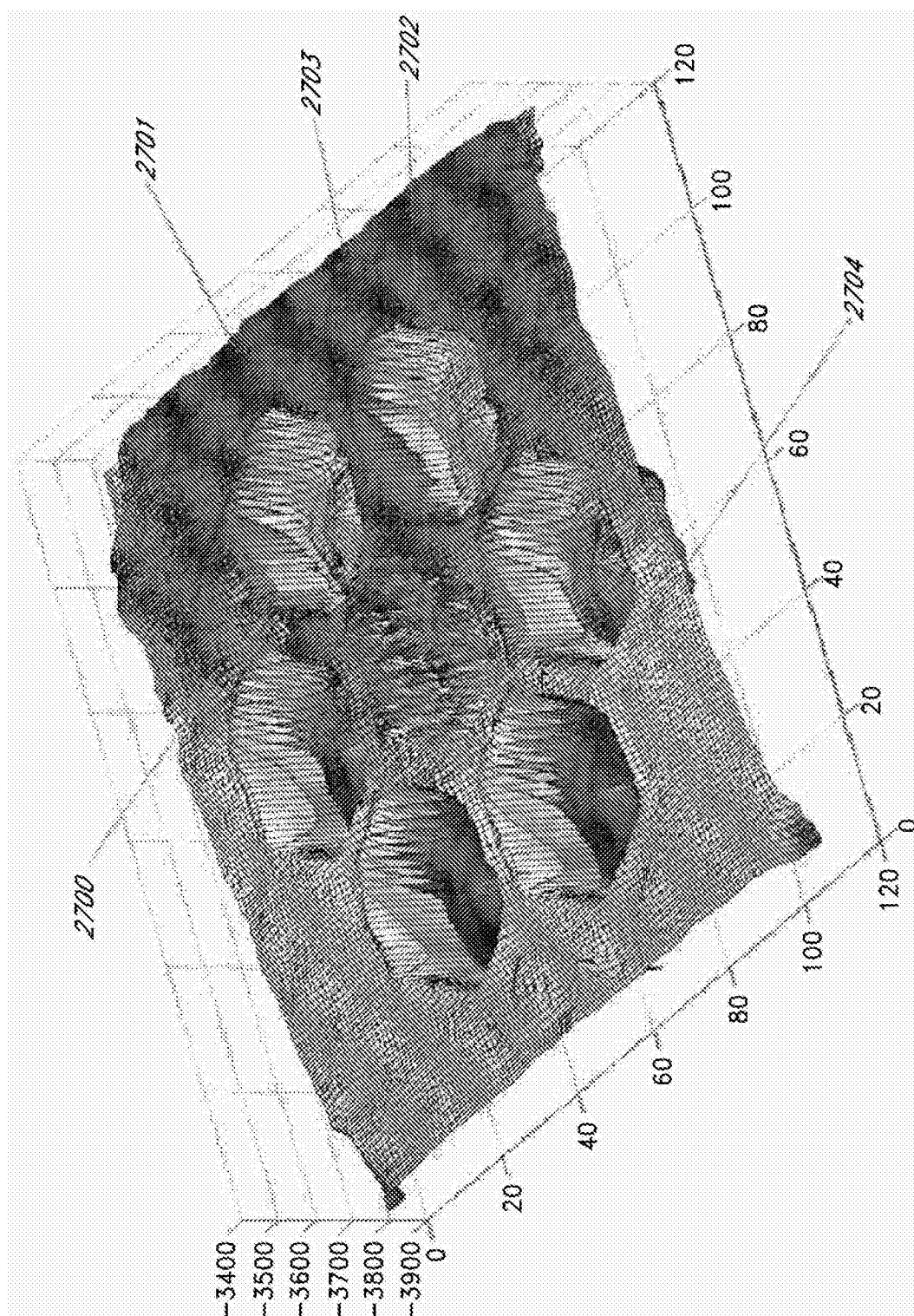


图 27

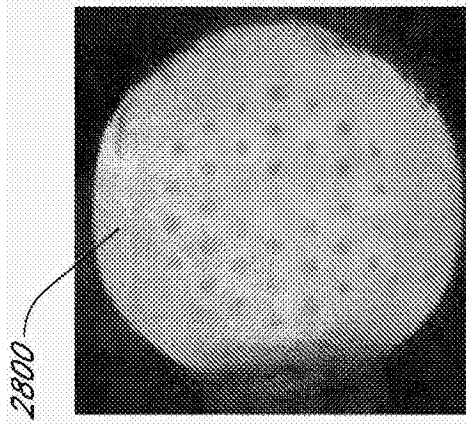


图 28A

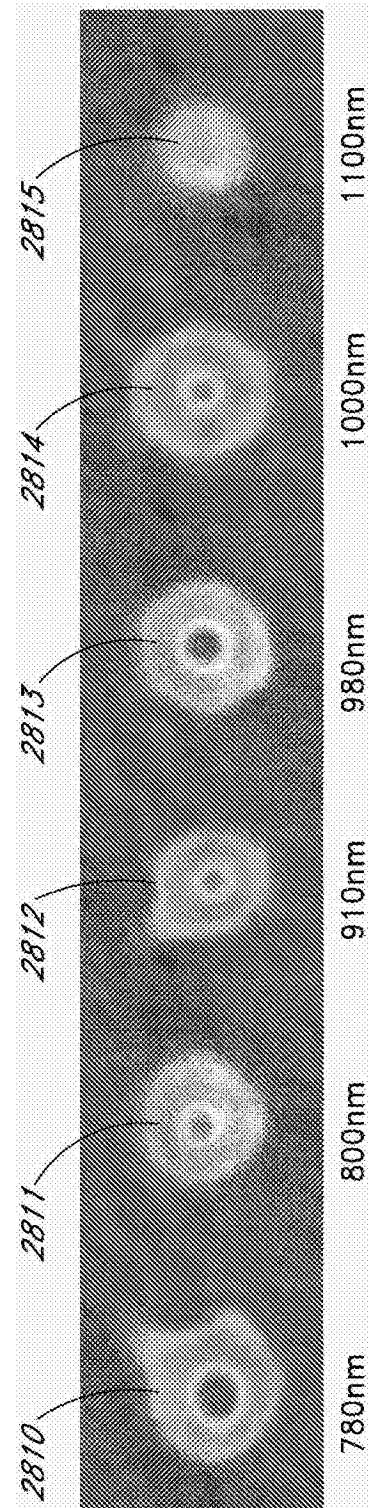


图 28C

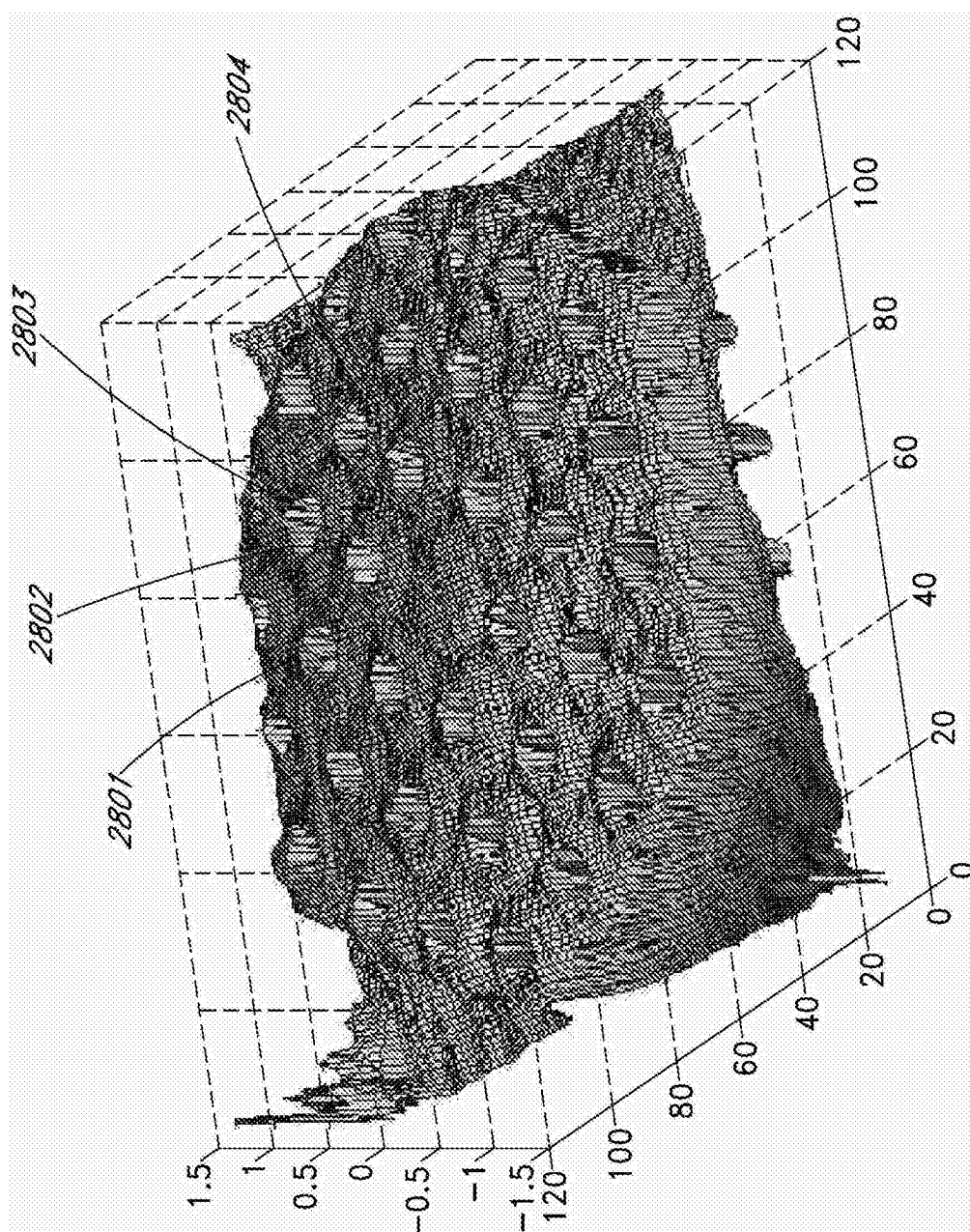


图 28B

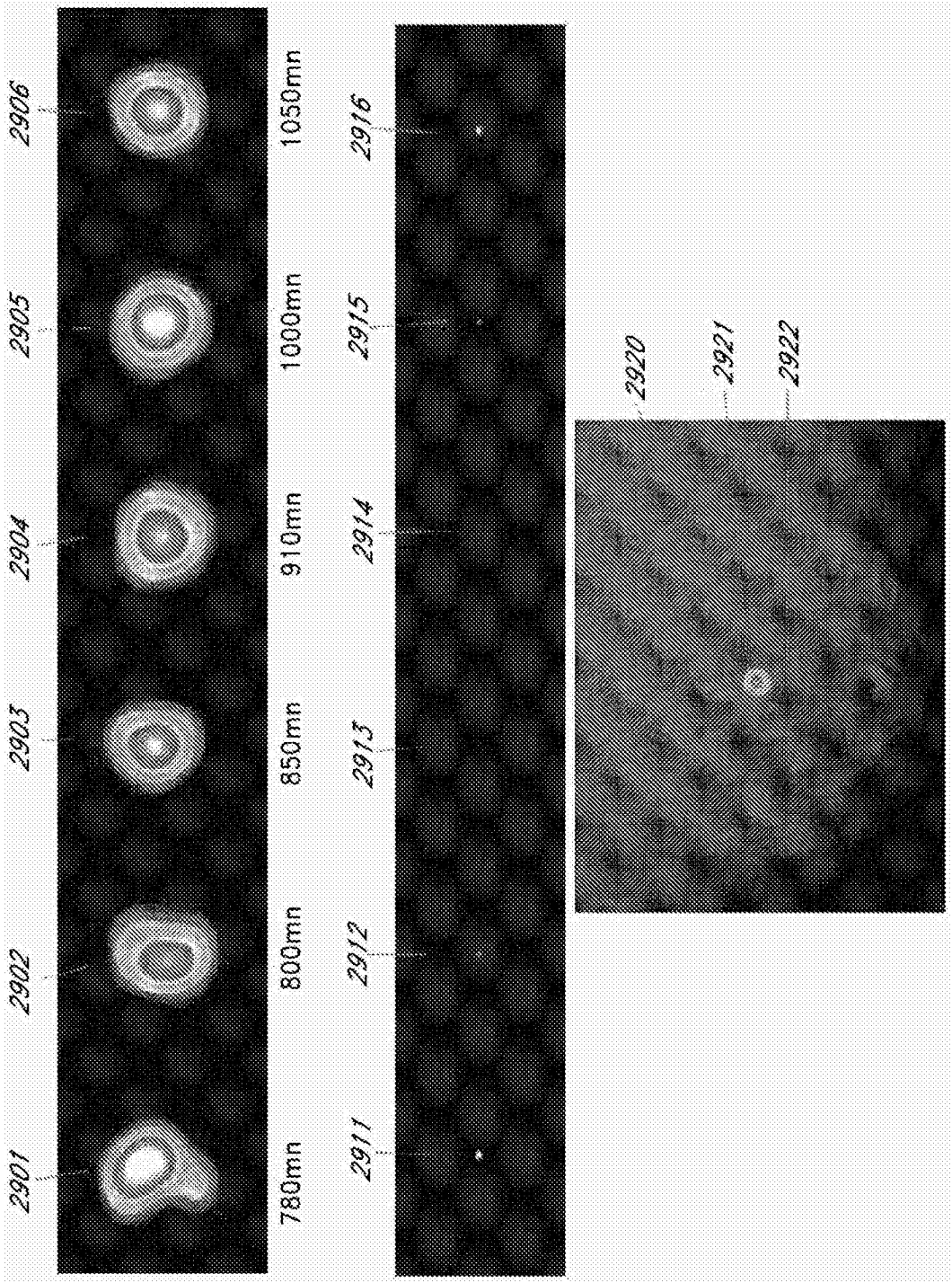


图 29

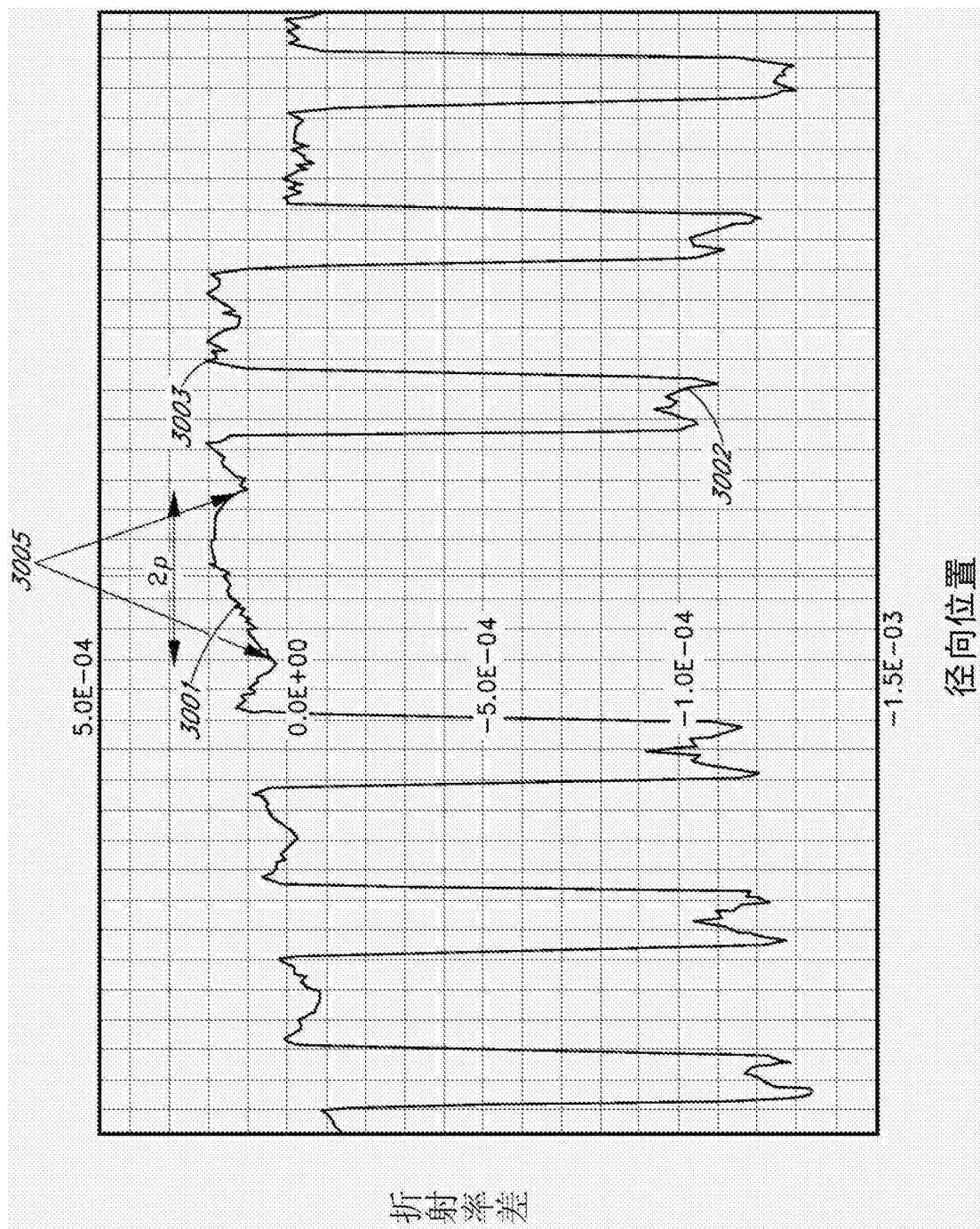


图 30

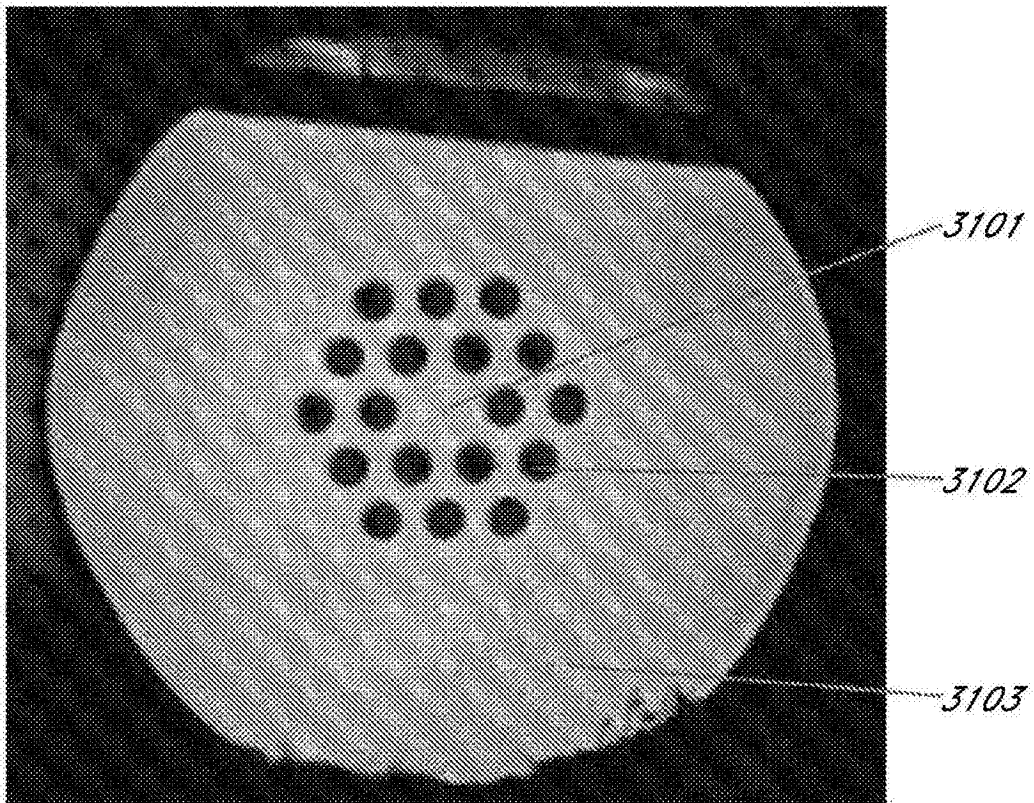


图 31

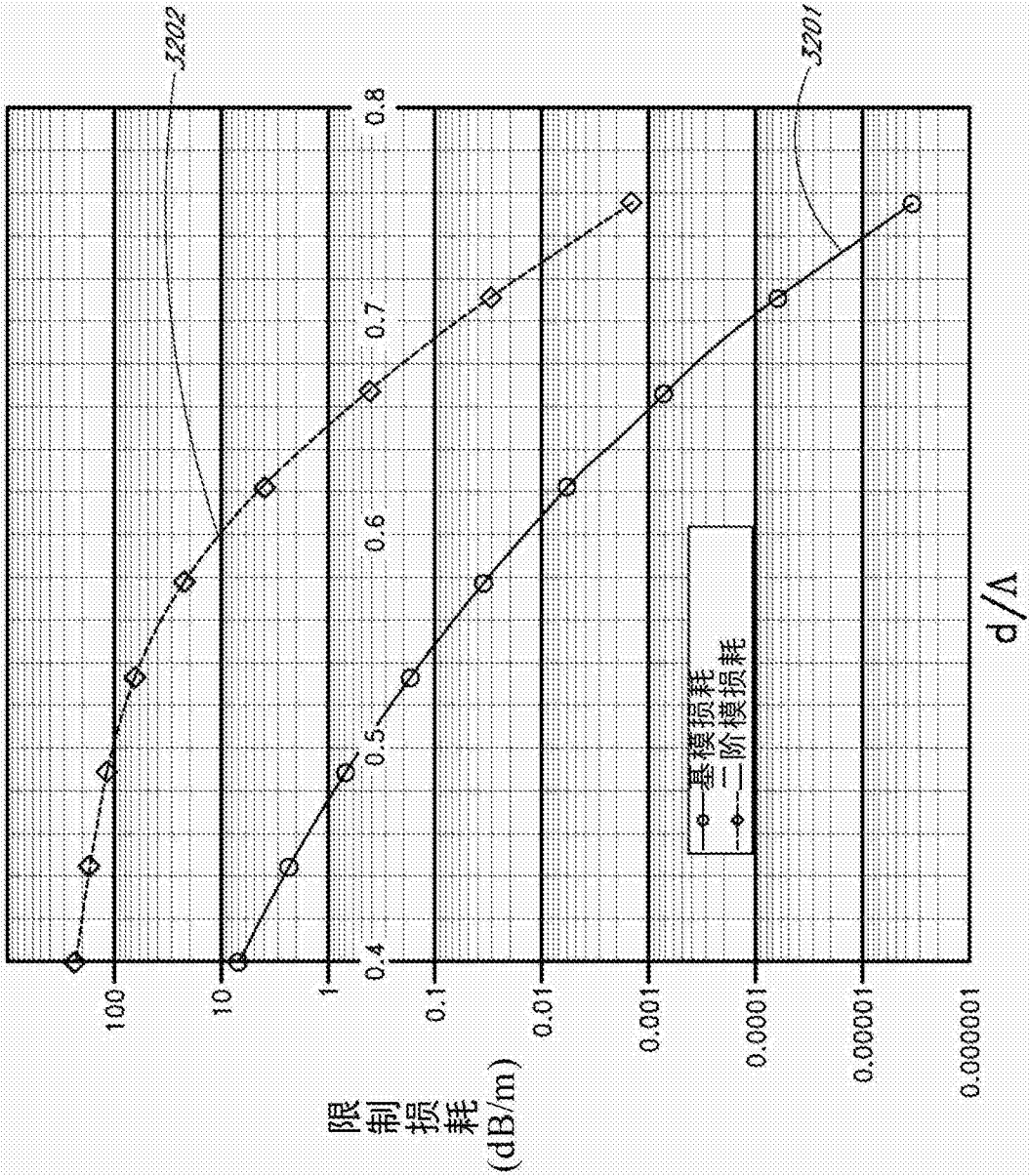


图 32

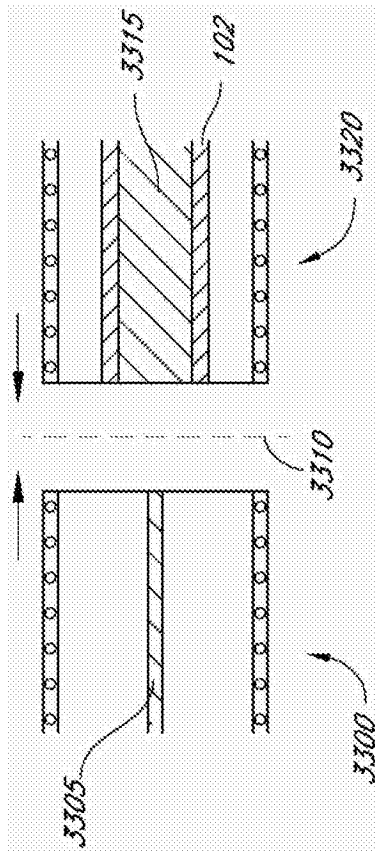


图 33A

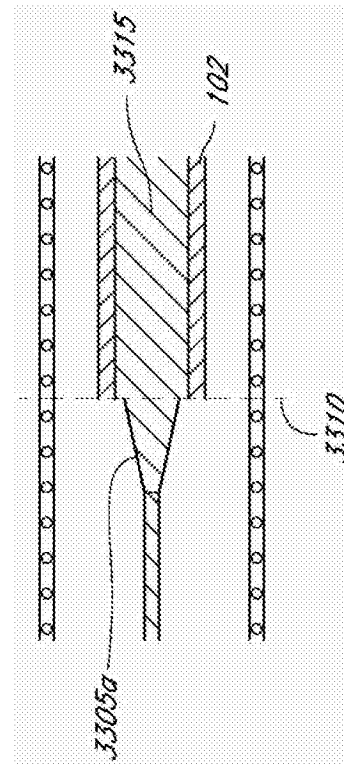


图 33B

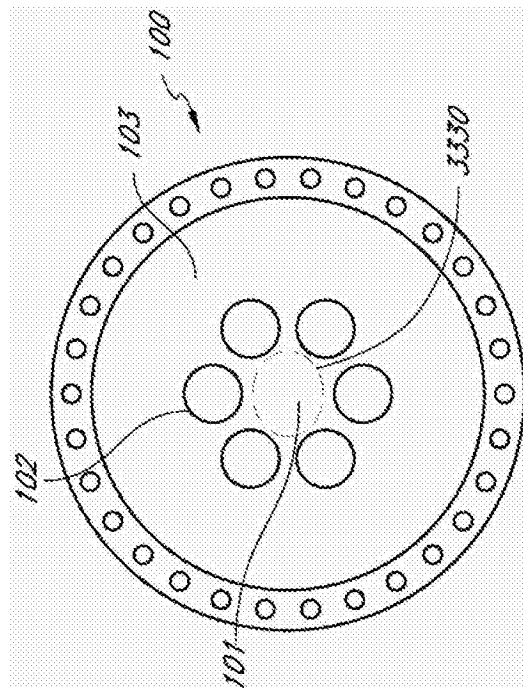


图 33C

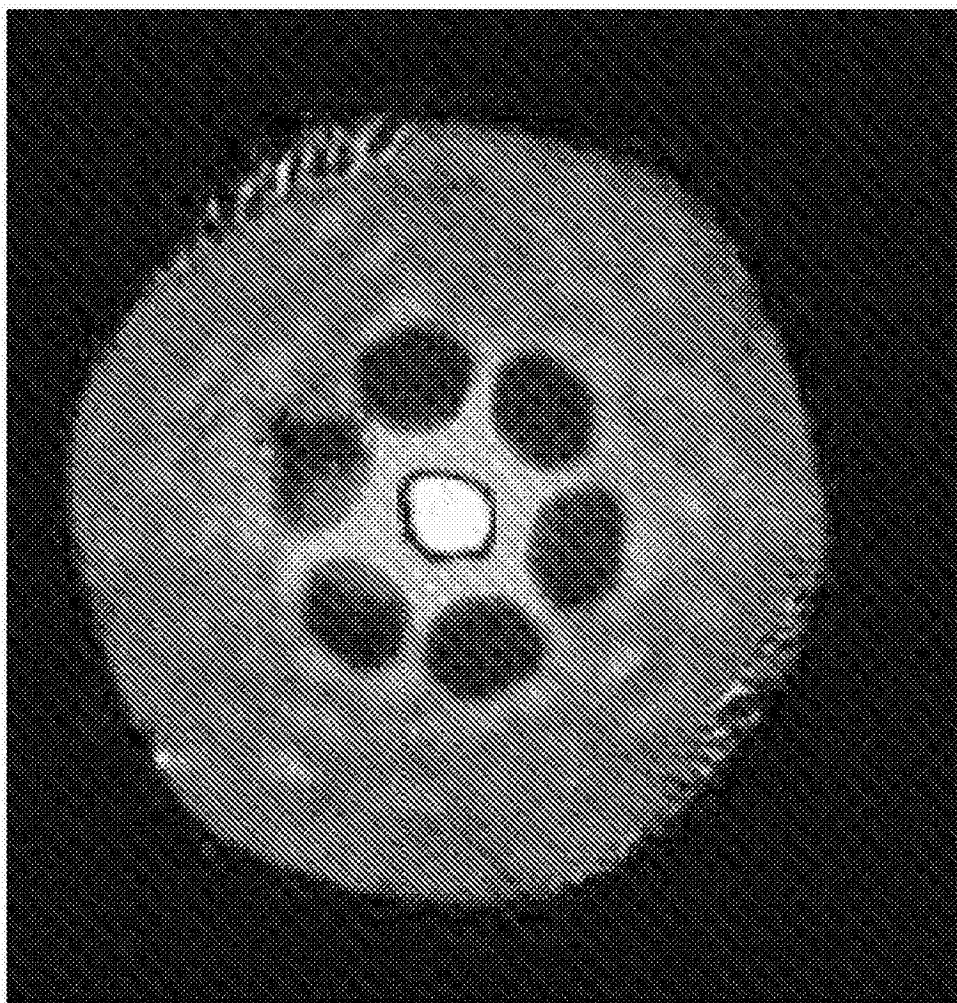


图 33D