



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 116209929 A

(43) 申请公布日 2023.06.02

(21) 申请号 202180064295.7

(22) 申请日 2021.07.21

(30) 优先权数据

63/054,563 2020.07.21 US

(85) PCT国际申请进入国家阶段日

2023.03.20

(86) PCT国际申请的申请数据

PCT/US2021/042473 2021.07.21

(87) PCT国际申请的公布数据

W02022/020416 EN 2022.01.27

(71) 申请人 康宁股份有限公司

地址 美国纽约州

(72) 发明人 S·R·别克汉姆 M·R·德拉克

S·D·哈特 李明军

J·E·姆卡蒂 钮渭钧 P·坦登

(74) 专利代理机构 上海专利商标事务所有限公司 31100

专利代理师 徐鑫 项丹

(51) Int.Cl.

G02B 6/036 (2006.01)

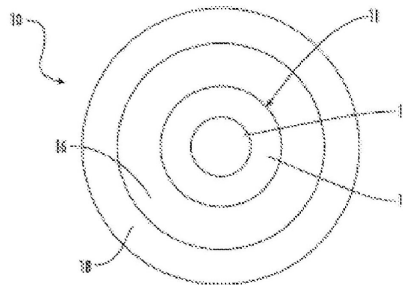
权利要求书2页 说明书47页 附图11页

(54) 发明名称

用于高密度光缆和互联件的具有薄涂层的单模光纤

(57) 摘要

提供的光纤包含：纤芯区域，具有小于约62.5微米半径的包层区域；包括高模量层和低模量层的聚合物涂层，其中，低模量内涂层的厚度范围是4微米至20微米，低模量内涂层的模量小于或等于约0.35MPa，高模量涂层的厚度范围是4微米至20微米，高模量内涂层的模量大于或等于约1.6GPa，以及其中，光纤的抗穿刺性大于20g，以及其中，光纤的微弯曲衰减惩罚小于0.03dB/km，以及其中，经涂覆的光纤的外直径小于或等于175微米。



1. 一种光纤,其包括:

纤芯区域;

围绕纤芯区域的包层区域,所述包层区域包含:与纤芯区域直接相邻的内包层,以及围绕内包层的外包层,其中,包层区域的半径小于约62.5微米;以及

聚合物涂层,其包括围绕包层区域的高模量涂料层以及布置在包层区域与高模量涂料层之间的低模量涂料层,其中,低模量涂料内层的厚度范围是4微米至20微米,低模量涂料内层的模量小于或等于约0.35MPa,高模量涂料层的厚度范围是4微米至20微米,高模量涂料内层的模量大于或等于约1.6GPa,以及其中,光纤的抗穿刺性大于20g,以及其中,光纤的微弯曲衰减惩罚小于0.03dB/km,以及其中,经涂覆的光纤的外直径小于或等于175微米,

其中,通过如下等式计算光纤的抗穿刺性: $P_R = P_0 + C_1 E_s A_s$ ,其中, $A_s$ 是高模量涂层的横截面面积,其中, $E_s$ 是高模量涂层的弹性模量,其中, $P_0$ 是数值为11.3g的系数,以及 $C_1$ 是数值为2.1g/MPa/mm<sup>2</sup>的系数,

其中,通过如下等式计算光纤的微弯曲衰减惩罚:
$$MAP = C_0 f_0 \sigma \frac{f_{RIP} f_g(E_g, R_g) f_p(E_p, t_p)}{f_{CS}(\frac{E_s}{E_p}, R_s, t_s)}$$

其中, $f_0$ 是与高模量涂层接触的外表面的平均横向压力,其中, $\sigma$ 是与高模量涂层接触的外表面的粗糙度的标准偏差,其中, $C_0 = 4 \times 10^{25} [(\frac{\pi}{4})^{2.625}]^{-1}$ ,以及其中, $f_g = \frac{1}{E_g^2 R_g^6}$ ,以及其中,

$f_p = \frac{E_p}{t_p^2}$ ,以及其中, $f_{CS} = [1 + \frac{E_s}{E_p} (\frac{t_s}{R_s})^3]^{0.375} \{ \frac{E_s}{E_p} [R_s^4 - (R_s - t_s)^4] \}^{0.625}$ ,其中, $R_g$ 是玻璃的半径,

$R_s$ 是高模量外涂层的外半径, $t_p$ 是低模量内涂层的厚度, $t_s$ 是高模量外涂层的厚度, $E_g$ 是玻璃的弹性模量, $E_p$ 是低模量内涂层的弹性模量,以及 $E_s$ 是高模量涂层的弹性模量。

2. 如权利要求1所述的光纤,其中,光纤的微弯曲衰减惩罚 $\leq 0.01$ dB/km。

3. 如权利要求1所述的光纤,其中,光纤的微弯曲衰减惩罚 $\leq 0.007$ dB/km。

4. 如权利要求1所述的光纤,其中,光纤的微弯曲衰减惩罚 $\leq 0.003$ dB/km。

5. 如权利要求1所述的光纤,其中,光纤的耐穿刺性 $\geq 25$ g。

6. 如权利要求1所述的光纤,其中,光纤的耐穿刺性 $\geq 30$ g。

7. 如权利要求1所述的光纤,其中,包层区域的半径小于52.5微米以及光纤的抗穿刺性大于40g。

8. 如权利要求1所述的光纤,其中,高模量涂料层的厚度是9微米至18微米。

9. 如权利要求1所述的光纤,其中,光纤的衰减小于0.20dB/km。

10. 如权利要求1所述的光纤,其中,光纤在1310nm处的模场直径 $\geq 8.6$ 。

11. 一种光纤,其包括:

纤芯区域;

围绕纤芯区域的包层区域,所述包层区域包含:与纤芯区域直接相邻的内包层,以及围绕内包层的外包层,其中,包层区域的半径约为45至55微米;以及

聚合物涂层,其包括围绕包层区域的高模量涂料层以及布置在包层区域与高模量涂料层之间的低模量涂料层,其中,低模量涂料内层的厚度范围是6微米至20微米,低模量涂料

内层的模量小于或等于约0.35MPa,高模量涂料层的厚度范围是12微米至18微米,高模量涂料内层的模量大于或等于约1.6GPa,以及其中,光纤的抗穿刺性大于30g,以及其中,光纤的微弯曲衰减惩罚小于0.03dB/km,以及其中,经涂覆的光纤的外直径小于或等于175微米,

其中,通过如下等式计算光纤的抗穿刺性: $P_R = P_0 + C_1 E_s A_s$ ,其中, $A_s$ 是高模量涂层的横截面面积,其中, $E_s$ 是高模量涂层的弹性模量,其中, $P_0$ 是数值为11.3g的系数,以及 $C_1$ 是数值为2.1g/MPa/mm<sup>2</sup>的系数,

其中,通过如下等式计算光纤的微弯曲衰减惩罚:
$$MAP = C_0 f_0 \sigma \frac{f_{RIP} f_g(E_g, R_g) f_p(E_p, t_p)}{f_{CS}(\frac{E_s}{E_p}, R_s, t_s)}$$

其中, $f_0$ 是与高模量涂层接触的外表面的平均横向压力,其中, $\sigma$ 是与高模量涂层接触的外表面的粗糙度的标准偏差,其中, $C_0 = 4 \times 10^{25} [(\frac{\pi}{4})^{2.65}]^{-1}$ ,以及其中, $f_g = \frac{1}{E_g^2 R_g^6}$ ,以及其中,

$f_p = \frac{E_p}{t_p^2}$ ,以及其中, $f_{CS} = [1 + \frac{E_s}{E_p} (\frac{t_s}{R_s})^3]^{0.375} \{ \frac{E_s}{E_p} [R_s^4 - (R_s - t_s)^4] \}^{0.625}$ ,其中, $R_g$ 是玻璃的半径,

$R_s$ 是高模量外涂层的外半径, $t_p$ 是低模量内涂层的厚度, $t_s$ 是高模量外涂层的厚度, $E_g$ 是玻璃的弹性模量, $E_p$ 是低模量内涂层的弹性模量,以及 $E_s$ 是高模量涂层的弹性模量。

12. 如权利要求11所述的光纤,其中,光纤的微弯曲衰减惩罚 $\leq 0.01$ dB/km。

13. 如权利要求11所述的光纤,其中,光纤的微弯曲衰减惩罚 $\leq 0.007$ dB/km。

14. 如权利要求11所述的光纤,其中,光纤的微弯曲衰减惩罚 $\leq 0.003$ dB/km。

15. 如权利要求1所述的光纤,其中,光纤的耐穿刺性 $\geq 25$ g。

16. 一种光纤,其包括:

纤芯区域;

围绕纤芯区域的包层区域,所述包层区域包含:与纤芯区域直接相邻的内包层,以及围绕内包层的外包层;以及

厚度为25um或更小的聚合物涂层,其中,聚合物涂层包括围绕包层区域的高模量涂料层,其中,高模量涂料层的杨氏模量为1.5GPa或更大,其中,经涂覆的光纤的外直径小于或等于175微米。

17. 如权利要求16所述的光纤,其还包括围绕包层区域的低模量涂料层,其中,低模量涂料层的杨氏模量为0.5MPa或更小并且布置在包层区域与高模量涂料层之间。

18. 如权利要求17所述的光纤,其中,低模量涂料层涂层的厚度与高模量涂料层的厚度之比范围是0.8至1.2。

19. 一种对光纤进行涂覆的方法,其包括:

从拉制炉沿着第一垂直路径拉制光纤;

引导光纤通过涂覆系统,其中,将聚合物涂层施涂到光纤,其中,涂覆系统包含:入口,与入口相对的直径为129 $\mu$ m至203 $\mu$ m的尺寸调节模头,以及布置在入口与尺寸调节模头之间的涂覆室,其中,涂覆室填充了液体形式的涂料材料;以及

使得经涂覆的光纤固化从而形成小于或等于175微米的经涂覆的光纤的外直径。

20. 如权利要求19所述的方法,其中,聚合物涂层具有大于70%的同心度。

## 用于高密度光缆和互联件的具有薄涂层的单模光纤

[0001] 相关申请的交叉参考

[0002] 本申请根据35 U.S.C. §119, 要求2020年7月21日提交的美国临时申请系列第63/054,563号的优先权权益, 本文其内容作为基础并将其全文通过引用结合于此。

### 技术领域

[0003] 本公开内容属于单模光纤。更具体来说, 本公开内容属于小直径单模光纤。最具体来说, 本公开内容属于在没有明显降低抗刺穿性的情况下涂层厚度减小的小直径单模光纤。

### 背景技术

[0004] 由于云计算和物联网需要高带宽、低延迟、低功耗和免疫EMI/RFI, 光纤技术正在渗透到数据中心。未来的超大规模数据中心需要特殊功能, 例如分布在50万平方英尺上的100K服务器, 因此产生了对于在数据中心内的互连方案中增加容量、灵活性和效率的需求。因此, 数据中心内需要大量互联件。带状光缆允许更高的光纤数; 然而, 这些更高的光纤数会需要更小直径的光纤来安装到带状光缆中。例如, 采用125 $\mu\text{m}$ 整体直径的裸光纤带状光缆取代250 $\mu\text{m}$ 整体直径的双层丙烯酸酯涂覆光纤带状光缆导致体积下降至少75%。然后, 将裸光纤加工成带状光缆会导致光纤破裂。

[0005] 此外, 海底光纤光缆设计成承载横跨陆地、大洋和海洋的电信信号。在过去数年间, 海底光缆上的电信信号急剧增加, 目前这些光缆上承载了超过90%的洲际通讯信号。因此, 由于受到不同大洲之间的互联网通讯增长的驱动, 增加了对于此类海底光缆传输能力的需求。传统上而言, 这种容量的增长是通过如下方式驱动获得的, 例如: 增加每根光纤的带宽容量, 但是增加比特率或使用密集波分复用(DWDM)的同时保持小的光纤数(通常在4到8个光纤对之间)。

[0006] 然而, 实施这些先进的传输技术已经使此类系统中的光中继器的电力消耗超过了终端所能供给的水平。这种功率限制迫使海底系统设计者使用更高的光纤数, 而这些更高的光纤数会需要更小直径的光纤来适应光中继器内部的有限空间。优选地, 这些光纤的包层直径需要维持在125微米来促进与常规单模光纤的熔合拼接, 这意味着通过降低保护涂层的厚度来实现较小的直径。这种较薄的涂层需要具有高模量结合足够大的横截面面积来确保对于刺穿和磨损的高抗性。

[0007] 希望对于前述情况进行改进。因此, 发明人开发了具有足够高机械可靠性的薄涂层单模光纤。

### 发明内容

[0008] 根据本公开内容的第1个实施方式, 本说明书延伸至光纤, 其具有: 纤芯区域; 围绕纤芯区域的包层区域, 所述包层区域包括: 与纤芯区域直接相邻的内包层, 以及围绕内包层的外包层, 其中, 包层区域的半径小于约62.6微米; 以及聚合物涂层, 其包括围绕包层区域

的高模量涂料层以及布置在包层区域与高模量涂料层之间的低模量涂料层,其中,低模量涂料内层的厚度范围是4微米至20微米,低模量涂料内层的模量小于或等于约0.35MPa,高模量涂料层的厚度范围是4微米至20微米,高模量涂料内层的模量大于或等于约1.6GPa,以及其中,光纤的抗穿刺性大于20g,以及其中,光纤的微弯曲衰减惩罚小于0.03dB/km,以及其中,经涂覆的光纤的外直径小于或等于175微米,其中,通过如下等式计算光纤的抗穿刺性: $P_R = P_0 + C_1 E_S A_S$ ,其中, $A_S$ 是高模量涂层的横截面面积,其中, $E_S$ 是高模量涂层的弹性模量,其中, $P_0$ 是数值为11.3g的系数,以及 $C_1$ 是数值为2.1g/MPa/mm<sup>2</sup>的系数,其中,通过如下等式

计算光纤的微弯曲衰减惩罚:
$$MAP = C_0 f_0 \sigma \frac{f_{RIP} f_g(E_g, R_g) f_p(E_p, t_p)}{f_{CS}(\frac{E_S}{E_p}, R_S, t_s)}$$
,其中, $f_0$ 是与高模量涂

层接触的外表面的平均横向压力,其中, $\sigma$ 是与高模量涂层接触的外表面的粗糙度的标准偏差,其中, $C_0 = 4 \times 10^{25} [(\frac{\pi}{4})^{2.65}]^{-1}$ ,以及其中, $f_g = \frac{1}{E_g^2 R_g^6}$ ,以及其中, $f_p = \frac{E_p}{t_p^2}$ ,以及其中,

$f_{CS} = [1 + \frac{E_S}{E_p} (\frac{t_S}{R_S})^3]^{0.375} \{ \frac{E_S}{E_p} [R_S^4 - (R_S - t_S)^4] \}^{0.625}$ ,其中, $R_g$ 是玻璃的半径, $R_S$ 是高模量外涂层的外半径, $t_p$ 是低模量内涂层的厚度, $t_s$ 是高模量外涂层的厚度, $E_g$ 是玻璃的弹性模量, $E_p$ 是低模量内涂层的弹性模量,以及 $E_S$ 是高模量涂层的弹性模量。

[0009] 根据本公开内容的第2个实施方式,第1个实施方式的光纤,其中,光纤的微弯曲衰减惩罚 $\leq 0.01$ dB/km。

[0010] 根据本公开内容的第3个实施方式,第1个实施方式的光纤,其中,光纤的微弯曲衰减惩罚 $\leq 0.007$ dB/km。

[0011] 根据本公开内容的第4个实施方式,第1个实施方式的光纤,其中,光纤的微弯曲衰减惩罚 $\leq 0.003$ dB/km。

[0012] 根据本公开内容的第5个实施方式,第1个实施方式的光纤,其中,光纤的抗穿刺性 $\geq 25$ g。

[0013] 根据本公开内容的第6个实施方式,第1个实施方式的光纤,其中,光纤的抗穿刺性 $\geq 30$ g。

[0014] 根据本公开内容的第7个实施方式,第1个实施方式的光纤,其中,包层区域的半径小于52.5微米以及光纤的抗穿刺性大于40g。

[0015] 根据本公开内容的第8个实施方式,第1个实施方式的光纤,其中,高模量涂料层的厚度是9微米至18微米。

[0016] 根据本公开内容的第9个实施方式,第1个实施方式的光纤,其中,光纤的衰减小于0.20dB/km。

[0017] 根据本公开内容的第10个实施方式,第1个实施方式的光纤,其中,光纤在1310nm处的模场直径 $\geq 8.6$ 。

[0018] 根据本公开内容的第11个实施方式,本说明书延伸至光纤,其具有:纤芯区域;围绕纤芯区域的包层区域,所述包层区域包括:与纤芯区域直接相邻的内包层,以及围绕内包层的外包层,其中,包层区域的半径约为45微米至55微米;以及聚合物涂层,其包括围绕包

层区域的高模量涂料层以及布置在包层区域与高模量涂料层之间的低模量涂料层,其中,低模量涂料内层的厚度范围是6微米至20微米,低模量涂料内层的模量小于或等于约0.35MPa,高模量涂料层的厚度范围是12微米至18微米,高模量涂料内层的模量大于或等于约1.6GPa,以及其中,光纤的抗刺穿性大于30g,以及其中,光纤的微弯曲衰减惩罚小于0.03dB/km,以及其中,经涂覆的光纤的外直径小于或等于175微米,其中,通过如下等式计算光纤的抗刺穿性: $P_R = P_0 + C_1 E_s A_s$ ,其中, $A_s$ 是高模量涂层的横截面面积,其中, $E_s$ 是高模量涂层的弹性模量,其中, $P_0$ 是数值为11.3g的系数,以及 $C_1$ 是数值为2.1g/MPa/mm<sup>2</sup>的系数,其

中,通过如下等式计算光纤的微弯曲衰减惩罚:
$$MAP = C_0 f_0 \sigma \frac{f_{RIP} f_g(E_g, R_g) f_p(E_p, t_p)}{f_{CS}(\frac{E_s}{E_p}, R_s, t_s)}$$
,其

中, $f_0$ 是与高模量涂层接触的外表面的平均横向压力,其中, $\sigma$ 是与高模量涂层接触的外表面的粗糙度的标准偏差,其中, $C_0 = 4 \times 10^{25} [(\frac{\pi}{4})^{2.65}]^{-1}$ ,以及其中, $f_g = \frac{1}{E_g^2 R_g^6}$ ,以及其中,

$f_p = \frac{E_p}{t_p^2}$ ,以及其中, $f_{CS} = [1 + \frac{E_s}{E_p} (\frac{t_s}{R_s})^3]^{0.375} \{ \frac{E_s}{E_p} [R_s^4 - (R_s - t_s)^4] \}^{0.625}$ ,其中, $R_g$ 是玻璃的半

径, $R_s$ 是高模量外涂层的外半径, $t_p$ 是低模量内涂层的厚度, $t_s$ 是高模量外涂层的厚度, $E_g$ 是玻璃的弹性模量, $E_p$ 是低模量内涂层的弹性模量,以及 $E_s$ 是高模量涂层的弹性模量。

[0019] 根据本公开内容的第12个实施方式,第11个实施方式的光纤,其中,光纤的微弯曲衰减惩罚 $\leq 0.01$ dB/km。

[0020] 根据本公开内容的第13个实施方式,第11个实施方式的光纤,其中,光纤的微弯曲衰减惩罚 $\leq 0.007$ dB/km。

[0021] 根据本公开内容的第14个实施方式,第11个实施方式的光纤,其中,光纤的微弯曲衰减惩罚 $\leq 0.003$ dB/km。

[0022] 根据本公开内容的第15个实施方式,第11个实施方式的光纤,其中,光纤的抗刺穿性 $\geq 25$ g。

[0023] 根据本公开内容的第16个实施方式,本说明书延伸至光纤,其具有:纤芯区域;围绕纤芯区域的包层区域,所述包层区域包括:与纤芯区域直接相邻的内包层,以及围绕内包层的外包层;厚度为25um或更小的聚合物涂层,其中,聚合物涂层包括围绕包层区域的高模量涂料层,其中,高模量涂料层的杨氏模量为1.5GPa或更大,其中,经涂覆的光纤的外直径小于或等于175微米。

[0024] 根据本公开内容的第17个实施方式,第16个实施方式的光纤,还包括围绕包层区域的低模量涂料层,其中,低模量涂料层的杨氏模量为0.5MPa或更小并且布置在包层区域与高模量涂料层之间。

[0025] 根据本公开内容的第18个实施方式,第16个实施方式的光纤,其中,低模量涂料层的厚度与高模量涂料层的厚度之比范围是0.8至1.2。

[0026] 根据本公开内容的第19个实施方式,本说明书延伸至光纤的涂覆方法,其包括:从拉制炉沿着第一垂直路径拉制光纤;引导光纤通过涂覆系统,其中,将聚合物涂层施涂到光纤,其中,涂覆系统包含:入口,与入口相对的直径为129um至203um的尺寸调节模头,以及布

置在入口与尺寸调节模头之间的涂覆室,其中,涂覆室填充了液体形式的涂料材料;以及使得经涂覆的光纤固化从而形成小于或等于175微米的经涂覆的光纤的外直径。

[0027] 根据本公开内容的第20个实施方式,第19个实施方式的光纤,其中,聚合物涂层具有大于70%的同心度(concentricity)。

[0028] 在以下的详细描述中给出了其他特征和优点,其中的部分特征和优点对本领域技术人员而言是容易理解的,或通过实施文字描述和其权利要求书以及附图中所述实施方式而被认识。

[0029] 要理解的是,上面的一般性描述和下面的详细描述都仅仅是示例性的,用来提供理解权利要求书的性质和特点的总体评述或框架。

[0030] 所附附图提供了进一步理解,附图被结合在本说明书中并构成说明书的一部分。附图是对本公开内容所选择方面的示意,并且与说明书一起用来对属于本公开内容的方法、产品和组合物的原理与操作进行解释。

### 附图说明

[0031] 图1是根据本公开内容一些实施方式的经涂覆的光纤的示意图。

[0032] 图2是根据本公开内容一些实施方式的代表性光纤带的示意图。

[0033] 图3是根据本公开内容一些实施方式的代表性光纤光缆的示意图。

[0034] 图4显示根据本公开内容一些实施方式的单模光纤的横截面。

[0035] 图5显示根据本公开内容一些实施方式的单模光纤的相对折射率分布。

[0036] 图6显示根据本公开内容实施方式的光纤的相对折射率分布。

[0037] 图7显示根据本公开内容实施方式的光纤的相对折射率分布。

[0038] 图8显示根据本公开内容的穿刺负荷强度作为高模量涂层的横截面面积的函数依赖性。

[0039] 图9显示根据本公开内容一些实施方式的单模光纤的相对折射率分布。

[0040] 图10是根据本公开内容一些实施方式的具有厚涂层的光纤的纤芯和包层模分布的示意图。

[0041] 图11是根据本公开内容一些实施方式的具有薄涂层的光纤的纤芯和包层模分布的示意图。

[0042] 图12显示根据本公开内容一些实施方式的涂料材料粘度和模头尺寸对于涂层厚度的影响。

[0043] 图13显示根据本公开内容一些实施方式的用于形成目标最终涂覆直径的示例性参数窗口。

[0044] 图14显示根据本公开内容一些实施方式的对于不同模头尺寸系统的源自各种涂料材料粘度的涂层厚度标准偏差。

[0045] 图15显示根据本公开内容一些实施方式的拉制速度对于涂层厚度的影响。

[0046] 图16显示绘制了根据本公开内容一些实施方式对于一系列的涂料材料粘度的润滑压力与模头尺寸之间的相关性的图。

[0047] 图17显示根据本公开内容一些实施方式的润滑压力与拉制速度之间的相关性。

[0048] 图18显示根据本公开内容一些实施方式的单模光纤的相对折射率分布。

[0049] 图19显示根据本公开内容一些实施方式的具有步阶状折射率和凹陷辅助光纤分布以及100微米包层直径的光纤的微弯曲衰减惩罚(MAP)与低模量涂层厚度的关系。

[0050] 图20显示根据本公开内容一些实施方式对于高模量涂层的不同模量,具有凹陷辅助光纤分布以及100微米包层直径的光纤的微弯曲衰减惩罚(MAP)与低模量涂层厚度的关系。

[0051] 图21显示根据本公开内容一些实施方式对于高模量涂层的不同模量,具有凹陷辅助光纤分布以及100微米包层直径的光纤的抗穿刺性与低模量涂层厚度的关系。

[0052] 图22显示根据本公开内容一些实施方式对于低模量涂层的不同模量,具有凹陷辅助光纤分布以及100微米包层直径的光纤的微弯曲衰减惩罚(MAP)与低模量涂层厚度的关系。

### 具体实施方式

[0053] 提供的本公开内容作为实现教导,并且可以通过参考以下描述、附图、实施例和权利要求更容易地理解。为此,本领域技术人员会意识和体会到,可以对本文所述的实施方式的各个方面进行各种变化,同时仍然获得有益结果。还显而易见的是,本实施方式所需的有益结果中的一部分可以通过选择一些特征而不利用其他的特征来获得。因此,本领域技术人员会认识到,许多更改和修改都是可能的,在某些情况下甚至是希望的,并且是本公开的一部分。因此,要理解的是,除非另有说明,否则本公开内容不限于所揭示的具体组合物、制品、装置和方法。还要理解的是,本文所使用的术语的目的仅为了描述特定的方面而不是限制性的。

[0054] 在本说明书和下面的权利要求书中提到许多术语,这些术语应定义为具有以下含义:

[0055] “光纤”指的是玻璃部分围绕有涂层的波导。玻璃部分包括纤芯和包层,并且在本文中被称为“玻璃纤维”。

[0056] “径向位置”、“半径”或者径向坐标“r”指的是相对于光纤的中心线( $r=0$ )的径向位置。

[0057] 除非另有说明,否则“折射率”指的是1550nm波长处的折射率。

[0058] “折射率分布”是折射率或相对折射率与半径之间的关系。对于本文所示的在相邻纤芯和/或包层区域之间具有阶梯式边界的相对折射率分布,处理条件的正常变化可排除在相邻区域的界面处获得锋利阶梯式边界。要理解的是,虽然本文可能将折射率分布的边界显示为折射率的阶梯式变化,但是实践中,边界可能是圆化的或者任意其他方式偏离完美阶梯式功能特性。还要理解的是,在纤芯区域和/或任意包层区域内,相对折射率值可能随着径向位置发生变化。当在光纤的特定区域(例如,纤芯区域和/或任意包层区域)内,相对折射率随着径向位置发生变化时,它可以用其实际或近似的函数依赖性,或其在该区域内的特定位置的值进行表示,或者以适用于该区域整体的平均值进行表示。除非另有说明,否则如果区域(例如,纤芯区域和/或任意包层区域)的相对折射率以单值或者作为适用于该区域作为整体的参数(例如, $\Delta$ 或 $\Delta\%$ )进行表述时,要理解的是,该区域中的相对折射率是恒定的或者近似恒定的,并且对应于该单值,或者该单值或参数表示依赖于该区域中的径向位置的非恒定相对折射率的平均值。例如,如果“i”是玻璃纤维的一个区域,除非另有说

明,否则参数  $\Delta_i$  指的是该区域中通过如下等式(1)所定义的相对折射率的平均值。无论是通过设计还是正常制造变化的结果,相对折射率对于径向位置的依赖性可能是倾斜的、弯曲的、或者任意其他方式非恒定的。

[0059] 如本文所用,“相对折射率”如等式(1)所定义:

$$[0060] \quad \Delta_i(r_i)\% = 100 \frac{(n_i^2 - n_{ref}^2)}{2n_i^2} \quad (1)$$

[0061] 除非另外说明,否则式中  $n_i$  是玻璃纤维中径向位置  $r_i$  处的折射率;以及除非另外说明,否则  $n_{ref}$  是纯二氧化硅玻璃的折射率。因此,如本文所用,相对折射率百分比是相对于(在1500nm波长处的数值为1.444的)纯二氧化硅玻璃而言。除非另有说明,否则,如本文所用的相对折射率用  $\Delta$  (或“ $\Delta$ ”)或者  $\Delta\%$  (或“ $\Delta\%$ ”)表示,其数值的单位是“%”。相对折射率也可以表示为  $\Delta(r)$  或  $\Delta(r)\%$ 。

[0062] 光纤的一个区域的平均相对折射率( $\Delta_{平均}$ )由等式(2)决定:

$$[0063] \quad \Delta_{平均} = \int_{r_{内}}^{r_{外}} \frac{\Delta(r)dr}{(r_{外} - r_{内})} \quad (2)$$

[0064] 式中,  $r_{内}$  是该区域的内半径,  $r_{外}$  是该区域的外半径,以及  $\Delta(r)$  是该区域的相对折射率。

[0065] 可以采用市售可得装置,例如:IFA-100光纤折射率分布仪(美国马萨诸塞州沙龙市国际光纤分析有限公司(Interfiber Analysis LLC, Sharon, MA USA))或者S14折射率分布仪(美国俄勒冈州比弗顿市光子动力有限公司(Photon Kinetics, Inc., Beaverton, OR USA)),来测量光纤的折射率分布。这些装置测量的是相对于测量参照折射率的折射率( $n(r) - n_{meas}$ ),式中,测量参照折射率  $n_{meas}$  是通常与油或纯二氧化硅玻璃相匹配的校准折射率。测量波长可以是:632.5nm、654nm、677.2nm、654nm、702.3nm、729.6nm、759.2nm、791.3nm、826.3nm、864.1nm、905.2nm、949.6nm、997.7nm、1050nm,或者其间的任意波长。然后如等式(1)所定义的那样将绝对折射率  $n(r)$  用于计算相对折射率。

[0066] 术语“ $\alpha$ -分布”或者“ $\alpha$ 分布”指的是相对折射率分布  $\Delta(r)$ ,其具有等式(3)所限定的函数形式:

$$[0067] \quad \Delta(r) = \Delta(r_0) \left[ 1 - \left[ \frac{|r - r_0|}{(r_z - r_0)} \right]^\alpha \right] \quad (3)$$

[0068] 式中,  $r_0$  是  $\Delta(r)$  为最大值时的径向位置,  $\Delta(r_0) > 0$ ,  $r_z > r_0$  是  $\Delta(r)$  减小到它最小值时的径向位置,以及  $r$  的范围是  $r_i \leq r \leq r_f$ , 式中,  $r_i$  是  $\alpha$ -分布的起始径向位置,  $r_f$  是  $\alpha$ -分布的最终径向位置,以及  $\alpha$  是实数。 $\Delta$  在本文中,  $\alpha$ -分布的  $\Delta(r_0)$  可以被称作  $\Delta_{max}$ , 或者当指的是光纤的具体区域  $i$  时,称作  $\Delta_{imax}$ 。当光纤纤芯区域的相对折射率分布用  $\alpha$ -分布描述时,且  $r_0$  位于中心线 ( $r=0$ ) 以及  $r_z$  对应纤芯区域的外半径  $r_1$  并且  $\Delta_1(r_1) = 0$ , 等式(3)简化为等式(4):

$$[0069] \quad \Delta_1(r) = \Delta_{1max} \left[ 1 - \left[ \frac{r}{r_1} \right]^\alpha \right] \quad (4)$$

[0070] 当纤芯区域具有等式(4)所描述的折射率时,可以通过如下方式从测得的相对折

射率分布确定外半径 $r_1$ 。最大相对折射率 $\Delta_{\text{max}}$ 、 $\alpha$ 和外半径 $r_{\text{lest}}$ 的估算值是通过测得的相对折射率分布的检查得到的,并且用于产生 $r=-r_{\text{lest}}$ 与 $r=r_{\text{lest}}$ 之间的试探函数 $\Delta_{\text{试探}}$ 。如图5和6所示是根据本公开内容实施方式具有通过 $\alpha$ -分布所描述的纤芯的代表性玻璃纤维的相对折射率分布。

[0071] “凹陷体积”定义如下:

$$[0072] \quad V_{\text{凹陷}} = \left| 2 \int_{r_{\text{凹陷,内}}}^{r_{\text{凹陷,外}}} \Delta_{\text{T凹陷}}(r) r dr \right| \quad (5)$$

[0073] 式中, $r_{\text{凹陷,内}}$ 是折射率分布的凹陷区域的内半径, $r_{\text{凹陷,外}}$ 是折射率分布的凹陷区域的外半径, $\Delta_{\text{凹陷}}(r)$ 是折射率分布的凹陷区域的相对折射率,以及 $r$ 是光纤中的径向位置。凹陷体积是绝对值并且是正数,在本文中表述的单位如下:% $\Delta$ 微米<sup>2</sup>、% $\Delta$ -微米<sup>2</sup>、% $\Delta$ - $\mu\text{m}^2$ 或% $\Delta$  $\mu\text{m}^2$ ,这些单位在本文中可互换使用。凹陷区域在本文中也称作下陷折射率包层区域,并且凹陷体积在本文中也被称作 $V_3$ 。

[0074] 光纤的“模场直径”或“MFD”由等式(6)定义:

[0075]  $\text{MFD} = 2w$

$$[0076] \quad w^2 = 2 \frac{\int_0^{\infty} (f(r))^2 r dr}{\int_0^{\infty} \left( \frac{df(r)}{dr} \right)^2 r dr} \quad (6)$$

[0077] 式中, $f(r)$ 是导光学信号的电场分布的横向分量, $r$ 是光纤中的径向位置。“模场直径”或“MFD”依赖于光学信号的波长,并且在本文中记录的是1310nm、1550nm和1625nm波长的情况。当本文涉及模场直径时,会具体指出波长。除非另有说明,否则模场直径指的是具体波长处的 $\text{LP}_{01}$ 模式。

[0078] 光纤的“有效面积”的定义如等式(7):

$$[0079] \quad A_{\text{eff}} = \frac{2\pi \left[ \int_0^{\infty} (f(r))^2 r dr \right]^2}{\int_0^{\infty} (f(r))^4 r dr} \quad (7)$$

[0080] 式中, $f(r)$ 是导光学信号的电场的横向分量, $r$ 是光纤中的径向位置。“有效面积”或者“ $A_{\text{eff}}$ ”取决于光学信号的波长,并且要理解的是,在本文中指的是1550nm波长的情况。

[0081] 如本文所用,术语“衰减”是光学功率随着信号沿着光纤传送时的损耗。通过IEC-60793-1-40标准(“Attenuation measurement methods(衰减测量方法)”)来测量衰减。

[0082] 本文中,可以通过如IEC-60793-1-47标准(“Measurement methods and test procedures-Macrobending loss(测量方法和测试方案:宏弯曲损耗)”)所规定的指定测试条件下的诱发衰减来度量光纤的抗弯曲性,表述为“弯曲损耗”。例如,测试条件可以包括将光纤绕着规定直径的心轴部署或缠绕一圈或多圈,例如,绕着15mm、20mm或30mm或者类似直径的心轴缠绕1圈(例如,“1 $\times$ 15mm直径弯曲损耗”或者“1 $\times$ 20mm直径弯曲损耗”或者“1 $\times$ 30mm直径弯曲损耗”)并测量每圈的衰减增加。

[0083] 如本文所用,“光缆截止波长”或者“光缆截止”涉及的是IEC 60793-1-44标准(“Measurement methods and test procedures-Cut-off wavelength(测量方法和测试方案:截止波长)”)所规定的22m光缆截止测试。

[0084] 本文公开的光纤包括：纤芯区域，围绕了纤芯区域的包层区域，以及围绕了包层区域的涂层。纤芯区域和包层区域是玻璃。包层区域包括多个区域。多个包层的区域优选是同心区域。包层区域包括内包层区域、下陷折射率包层区域和外包层区域。内包层区域围绕且与纤芯区域直接相邻。下陷折射率包层区域围绕且与内包层区域直接相邻，从而使得下陷折射率包层区域在径向方向上布置在内包层与外包层之间。外包层区域围绕且与下陷折射率区域直接相邻。下陷折射率区域的相对折射率低于内包层和外包层区域。下陷折射率包层区域在本文中也可以被称作凹陷或者凹陷区域。内包层区域的相对折射率可以小于、等于、或者大于外包层区域的相对折射率。下陷折射率包层区域可以起到降低弯曲损耗和微弯曲敏感性的作用。纤芯区域、内包层区域、下陷折射率包层区域和外包层区域也分别被称作纤芯、包层、内包层、下陷折射率包层和外包层。

[0085] 如本文任何地方所用的那样，径向位置 $r_1$ 和相对折射率 $\Delta_1$ 或 $\Delta_1(r)$ 涉及的是纤芯区域，径向位置 $r_2$ 和相对折射率 $\Delta_2$ 或 $\Delta_2(r)$ 涉及的是内包层区域，径向位置 $r_3$ 和相对折射率 $\Delta_3$ 或 $\Delta_3(r)$ 涉及的是下陷折射率包层区域，径向位置 $r_4$ 和相对折射率 $\Delta_4$ 或 $\Delta_4(r)$ 涉及的是外包层区域，径向位置 $r_5$ 涉及的是任意的低模量内涂层，径向位置 $r_6$ 涉及的是高模量涂层，以及径向位置 $r_7$ 涉及的是任意的颜料外涂层。

[0086] 相对折射率 $\Delta_1(r)$ 具有最大值 $\Delta_{1max}$ 和最小值 $\Delta_{1min}$ 。相对折射率 $\Delta_2(r)$ 具有最大值 $\Delta_{2max}$ 和最小值 $\Delta_{2min}$ 。相对折射率 $\Delta_3(r)$ 具有最大值 $\Delta_{3max}$ 和最小值 $\Delta_{3min}$ 。相对折射率 $\Delta_4(r)$ 具有最大值 $\Delta_{4max}$ 和最小值 $\Delta_{4min}$ 。在相对折射率在区域上是恒定或者近似恒定的实施方式中，相对折射率的最大值和最小值是相等或者近似相等的。除非另有说明，否则如果对于区域的相对折射率记录的是单值的话，则该单值对应于该区域的平均值。

[0087] 要理解的是，中心纤芯区域是基本圆柱形形状，以及围绕的内包层区域、下陷折射率包层区域、外包层区域、低模量涂层和高模量涂层是基本环状形状。环状区域可以用内半径和外半径进行表征。在本文中，径向位置 $r_1$ 、 $r_2$ 、 $r_3$ 、 $r_4$ 、 $r_5$ 、 $r_6$ 和 $r_7$ 涉及的分别是纤芯、内包层、下陷折射率包层、外包层、低模量内涂层、高模量涂层和任意的颜料外涂层的最外半径。在没有颜料外涂层的实施方式中，半径 $r_6$ 还对应于光纤的外半径。颜料外涂层可以具有高模量。当存在颜料外涂层时，半径 $r_7$ 对应于光纤的外半径。

[0088] 当两个区域相互直接相邻时，两个区域中靠内那个的外半径与两个区域中靠外那个的内半径是一致的。例如，光纤包括下陷折射率包层区域，其被外包层区域围绕且直接相邻。半径 $r_3$ 对应下陷折射率包层区域的外半径和外包层区域的内半径。相对折射率分布还包括下陷折射率包层区域，其围绕且与内包层区域直接相邻。径向位置 $r_2$ 对应内包层区域的外半径和下陷折射率包层区域的内半径。类似地，径向位置 $r_1$ 对应于纤芯区域的外半径和内包层区域的内半径。

[0089] 径向位置 $r_2$ 与径向位置 $r_1$ 之差在本文被称作内包层区域的厚度。径向位置 $r_3$ 与径向位置 $r_2$ 之差在本文被称作下陷折射率包层区域的厚度。径向位置 $r_4$ 与径向位置 $r_3$ 之差在本文被称作外包层区域的厚度。径向位置 $r_5$ 与径向位置 $r_4$ 之差在本文被称作低模量涂层的厚度。径向位置 $r_6$ 与径向位置 $r_5$ 之差在本文被称作高模量涂层的厚度。

[0090] 如下文进一步详述，纤芯区域、内包层区域、下陷折射率包层区域和外包层区域的相对折射率可以是不同的。区域中的每一个可以分别由经过掺杂或者未经掺杂的二氧化硅玻璃形成。可以采用本领域技术人员已知的技术，通过结合正掺杂剂或负掺杂剂，结合的水

平设计成提供目标折射率或折射率分布,从而完成相对于未经掺杂的二氧化硅玻璃的折射率的变化。正掺杂剂是增加了玻璃相对于未掺杂的玻璃组合物的折射率的掺杂剂。负掺杂剂是降低了玻璃相对于未掺杂的玻璃组合物的折射率的掺杂剂。在一个实施方式中,未经掺杂的玻璃是二氧化硅玻璃。当未掺杂的玻璃是二氧化硅玻璃时,正掺杂剂包括Cl、Br、Ge、Al、P、Ti、Zr、Nb、和Ta,以及负掺杂剂包括氟和硼。可以通过不掺杂或者在区域的厚度上以均匀的浓度进行掺杂,来形成恒定折射率的区域。通过掺杂剂在区域厚度上的非均匀空间分布和/或通过在不同区域中结合不同掺杂剂,来形成折射率变化的区域。

[0091] 杨氏模量、%拉伸和撕裂强度的数值指的是通过本文所述方案的测量条件下确定的数值。

[0092] 下面将详细参见本说明书的示意性实施方式。

[0093] 一个实施方式涉及光纤。光纤包括被涂层围绕的玻璃纤维。图1以横截面示意图显示光纤的例子。光纤10包括被任选的低模量内涂层16以及高模量涂层18围绕的玻璃纤维11。在一些实施方式中,高模量涂层18可以包含颜料。下面提供了对于玻璃纤维11、任选的低模量内涂层16、以及高模量涂层18的进一步描述。此外,一个或多个颜料外涂层可以围绕高模量涂层18。

[0094] 图2显示光纤带30,其可以包括多根光纤20和包封所述多根光纤的基质32。光纤20中的每一根包括:纤芯区域、包层区域、任选的低模量内涂层、以及高模量涂层,如上文所述。如上文所述,光纤20还可以包括颜料外涂层。

[0095] 如图2所示,光纤20以基本平面和平行关系相互对准。通过任意数种已知构造(例如,边缘粘结的带、薄包封的带、厚包封的带或者多层带),通过制造光纤带的常规方法,用带基质32将光纤包封在光纤带30中。图2的实施方式中的光纤带30含有十二(12)根光纤20。然而,考虑可以将任意数量的光纤20(例如,2根或更多根、4根或更多根、6根或更多根、8根或更多根、12根或更多根、或者16根或更多根)用于形成特定用途的光纤带30。带基质32的拉伸性质类似于高模量涂层的拉伸性质,并且可以通过与用于制备高模量涂层相同、相似或者不同的组合物形成。

[0096] 图3显示光纤光缆40,其包括被夹套42所围绕的多根光纤20。在一些实施方式中,光纤光缆40是海底光缆。在一些实施方式中,光纤光缆40是用于数据中心中的互联方案中的光纤带。光纤20可以以致密或疏松的方式封装成被夹套42的内表面44包封的导管。夹套42中所放入的光纤的数量被称作光纤光缆40的“光纤数”。如下文进一步讨论的那样,本公开内容的光纤具有减小的直径,从而提供了高“光纤数”。

[0097] 夹套42通过挤出的聚合物材料形成,并且可以包括聚合物或者其他材料的多层同心层。光纤光缆40可以包括嵌入在夹套42中或者放在被内表面44所限定的导管中的一个或多个强化元件(未示出)。强化元件包括比夹套42更为刚性的纤维或棒。强化元件可以由金属、编织钢、玻璃强化塑料、纤维玻璃或者其他合适材料制造。光纤光缆40可以包括被夹套42所围绕的其他层(例如,保护层、防潮层、撕裂线等。此外,光纤光缆40可以具有绞合松套管芯或其他光纤光缆构造。

[0098] 玻璃纤维

[0099] 如图1所示,玻璃纤维11包括纤芯区域12和包层区域14,这是本领域已知的。纤芯区域12的折射率高于包层区域14,以及玻璃纤维11起到波导的作用。在许多应用中,纤芯区

域12与包层区域14具有可辨识的纤芯-包层边界。或者,纤芯区域12与包层区域14会缺乏能区分的边界。

[0100] 在一些实施方式中,纤芯区域12具有随着相对于玻璃纤维的中心的距离发生变化的折射率。例如,纤芯区域12可以具有 $\alpha$ -分布的相对折射率分布(如上文等式(3)所定义), $\alpha$ 值是大于或等于2且小于或等于100,或者例如 $\alpha$ 值是:大于或等于2且小于或等于10,或者大于或等于2且小于或等于6,或者大于或等于2且小于或等于4,或者大于或等于4且小于或等于20,或者大于或等于6且小于或等于20,或者大于或等于8且小于或等于20,或者大于或等于10且小于或等于20,或者大于或等于10且小于或等于40。

[0101] 如图4所示是示例性光纤的示意性横截面图。在一些实施方式中,图4的光纤可以用于海底光缆或者光学方式连接到海底中继器中的组件。在一些实施方式中,图4的光纤可以用于数据中心互联。在图4中,光纤46包括:纤芯区域48、包层区域50、任选的低模量内涂层56、以及高模量涂层58。包层区域50包括:内包层区域51、下陷折射率包层区域53和外包层区域55。颜料外涂层(例如,墨层)任选地围绕或者与高模量涂层直接相邻。

[0102] 如上文所讨论的那样,光纤46可以具有减小的涂层直径。此类减小的直径可以增加例如当用于海底光缆或中继器或者数据中心互联时的光纤46的光纤密度(例如,“光纤数”)。为了为具有较小直径的光纤46提供低衰减、大有效面积、低弯曲损耗和足够高的机械可靠性,对光纤的性质进行具体调节,如下文更进一步讨论。

[0103] 如图5所示是根据本公开内容实施方式的玻璃纤维的代表性相对折射率分布。图5的光纤60的分布显示:纤芯区域(1),其具有外半径 $r_1$ 和相对折射率 $\Delta_1$ ,所述折射率 $\Delta_1$ 具有最大相对折射率 $\Delta_{1max}$ ;内包层区域(2),其从径向位置 $r_1$ 延伸到径向位置 $r_2$ 并且具有相对折射率 $\Delta_2$ ;下陷折射率包层区域(3),其从径向位置 $r_2$ 延伸到径向位置 $r_3$ 并且具有相对折射率 $\Delta_3$ ;以及外包层区域(4),其从径向位置 $r_3$ 延伸到径向位置 $r_4$ 并且具有相对折射率 $\Delta_4$ 。在图5的分布中,下陷折射率包层区域(3)可以在本文中被称作凹陷并且具有恒定或者平均的相对折射率,该折射率小于内包层区域(2)和外包层区域(4)的相对折射率。纤芯区域(1)在分布中具有最高的平均和最大相对折射率。在一些实施方式中,纤芯区域(1)可以在中心线或者靠近中心线处具有较低折射率区域(现有技术中已知为“中心线下沉”)(未示出)。在一些实施方式中,纤芯区域(1)可以在中心线或者靠近中心线处具有较高折射率区域(称作“中心线尖峰”)(未示出)。

[0104] 在图5的相对折射率分布中,玻璃纤维的纤芯区域(1)具有 $\alpha$ -分布, $\alpha$ 值大于或等于2且小于或等于20。 $\alpha$ -分布的径向位置 $r_0$ (对应于 $\Delta_{1max}$ )对应于光纤的中心线( $r=0$ ),而 $\alpha$ -分布的径向位置 $r_z$ 对应于纤芯半径 $r_1$ 。在具有中心线下沉的实施方式中,径向位置 $r_0$ 可能偏离光纤的中心线。在一些实施方式中,在远离中心线的径向方向上,相对折射率 $\Delta_1$ 持续减小。在其他实施方式中,相对折射率 $\Delta_1$ 在中心线与 $r_1$ 之间的一些径向位置上变化,并且在中心线与 $r_1$ 之间的其他径向位置上还包括恒定或者近似恒定数值。

[0105] 在图5中,从内包层区域(2)到下陷折射率包层区域(3)的过渡区域61以及从下陷折射率包层区域(3)到外包层区域(4)的过渡区域62显示为阶梯状变化。要理解的是,阶梯状变化是理想化的,在实践中,过渡区域61和/或过渡区域62可能不是如图5所示的严格垂直的情况。作为替代,过渡区域61和/或过渡区域62可能具有斜率或者曲率。当过渡区域61和/或过渡区域62不是垂直的情况时,下陷折射率包层区域(3)的内半径 $r_2$ 和外半径 $r_3$ 分别

对应过渡区域61和62的中点。中点对应下陷折射率包层区域(3)的深度63的一半处。

[0106] 在如图5所示的相对折射率分布中的相对折射率 $\Delta_1$ 、 $\Delta_2$ 、 $\Delta_3$ 和 $\Delta_4$ 的相对次序满足如下条件： $\Delta_{1\max} > \Delta_4 > \Delta_3$ 且 $\Delta_{1\max} > \Delta_2 > \Delta_3$ 。 $\Delta_2$ 和 $\Delta_4$ 的值可以相等或者一个比另一个大，但是 $\Delta_2$ 和 $\Delta_4$ 都在 $\Delta_{1\max}$ 与 $\Delta_3$ 之间。

[0107] 相对折射率 $\Delta_1$ 、 $\Delta_2$ 、 $\Delta_3$ 和 $\Delta_4$ 基于纤芯区域、内包层区域、下陷折射率包层区域和外包层区域中所用的材料。下文提供了对于相对折射率 $\Delta_1$ 、 $\Delta_2$ 、 $\Delta_3$ 和 $\Delta_4$ 的这些材料的描述。

[0108] 虽然图5显示了一种示例性光纤的示意性横截面图，但是本文所述的实施方式可以使用其他合适的光纤。例如，图9是可以用于本文所述实施方式的单模光纤的一般性分布设计的示意性横截面图。图9的光纤的分布显示：纤芯区域，其具有外半径 $r_1$ 和相对折射率 $\Delta_1$ ；内包层区域，其从径向位置 $r_1$ 延伸到径向位置 $r_2$ 并且具有相对折射率 $\Delta_2$ ；下陷折射率包层区域，其从径向位置 $r_2$ 延伸到径向位置 $r_3$ 并且具有相对折射率 $\Delta_3$ ；以及外包层区域，其从径向位置 $r_3$ 延伸到径向位置 $r_4$ 并且具有相对折射率 $\Delta_4$ 。下表1和2显示了可以用于本文所述实施方式的各种示例性光纤分布设计，以及表3显示可以用于本文所述实施方式的各种示例性光纤分布设计的各种光学性质。

[0109] 表1：示例性光纤分布设计

	实施 例 1	实施 例 2	实施 例 3	实施 例 4	实施 例 5	实施 例 6
纤芯 $\Delta D_1$ (%)	0.34	0.29	0.405	0.34	0	0
$\alpha$	20	20	2.4	20	20	20
纤芯半径 $r_1$ (微米)	4.5	4.35	5.9	4.05	4.9	5.9
内包层 $\Delta D_2$ (%)	na	-0.08	0	0	-0.4	-0.3
内包层半径 $r_2$ (微米)	na	12	10	9.8	20	22
凹陷 $\Delta D_3$ (%)	na	na	na	-0.4	na	na
凹陷半径 $r_3$ (微米)	na	na	na	16	na	na
外包层 $\Delta D_4$ (%)	0	0	0.05	0	-0.3	-0.2
光缆截止 (nm)	1208	1205	1196	1210	1405	1472
1310 nm 处的 MFD (微米)	9.2	8.8	9.2	8.8	9.1	10.7
1310 nm 处的 $A_{\text{eff}}$ (微米 <sup>2</sup> )	66.7	61.9	65.1	60.6	67.6	94.5
1310 nm 处的色散 (ps/nm.km)	0.33	0.31	-0.10	-0.25	3.17	3.57
1310 nm 处的色散斜率 (ps/nm <sup>2</sup> .km)	0.0862	0.0844	0.0884	0.0896	0.0855	0.0878
1550 nm 处的 MFD (微米)	10.4	10.0	10.5	10.0	10.1	11.8
1550 nm 处的 $A_{\text{eff}}$ (微米 <sup>2</sup> )	83.1	77.4	82.6	75.8	80.1	110.8
1550 nm 处的色散 (ps/nm.km)	17.0	16.3	16.9	17.7	19.8	20.7

[0110]

[0111]	1550 nm 处的色散斜率 (ps/nm <sup>2</sup> .km)	0.0577	0.0533	0.0579	0.0645	0.0575	0.0597
--------	--	--------	--------	--------	--------	--------	--------

[0112] 表2:示例性光纤分布设计

	实施例	实施例	实施例	实施例	实施例
	1	2	3	4	5
$\Delta 1$ (%)	0.399	0.401	0.394	0.391	0.382
$r_1$ (微米)	4.33	4.38	4.26	4.37	4.29
$\alpha$	10.07	10.28	11.32	10.85	9.81
$\Delta 2$ (%)	0	0	0	0	0
$\Delta 3$ (%)	-0.443	-0.394	-0.383	-0.417	-0.292
$r_2$ (微米)	9.04	9.38	10.47	10.19	10.64
$r_3$ (微米)	14.71	14.90	15.88	16.28	17.83
凹陷体积 (%-微米 <sup>2</sup> )	59.7	52.8	54.6	67.1	59.8
1310 nm 处的 MFD (微米)	8.45	8.50	8.52	8.59	8.61
[0113] 1550 nm 处的 MFD (微米)	9.43	9.49	9.61	9.65	9.76
1310 nm 处的色散 (ps/nm/km)	0.56	0.51	-0.18	0.22	-0.47
1310 nm 处的斜率 (ps/nm <sup>2</sup> /km)	0.090	0.090	0.088	0.089	0.088
零色散波长 (nm)	1304	1304	1312	1307	1315
理论截止 (nm)	1245	1269	1248	1264	1224
光纤截止 (nm)	1240	1260	1240	1260	1220
1550 nm 处的弯曲损耗, 10 mm 直径心轴 (dB/ 圈)	0.049	0.072	0.082	0.03	0.078

[0114] 表2续

	实施例 6	实施例 7	实施例 8	实施例 9	实施例 10
$\Delta 1$ (%)	0.371	0.382	0.368	0.352	0.334
$r_1$ (微米)	4.37	4.70	4.51	4.51	4.57
$\alpha$	10.48	7.74	9.97	10.07	11.00
$\Delta 2$ (%)	0	0	0	0	0
$\Delta 3$ (%)	-0.375	-0.385	-0.333	-0.360	-0.365
$r_2$ (微米)	9.61	11.02	9.98	9.93	10.19
$r_3$ (微米)	14.28	15.13	15.27	14.59	14.62
凹槽体积 (%-微米 <sup>2</sup> )	41.8	41.4	44.5	41.2	40.1
1310 nm 处的 MFD (微米)	8.71	8.83	8.84	8.96	9.17
1550 nm 处的 MFD (微米)	9.77	9.91	9.91	10.05	10.29
1310 nm 处的色散 (ps/nm/km)	0.28	0.46	0.46	0.47	0.59
1310 nm 处的斜率 (ps/nm <sup>2</sup> /km)	0.090	0.089	0.089	0.090	0.090
零色散波长 (nm)	1307	1305	1305	1305	1303
理论截止 (nm)	1224	1305	1254	1228	1219
光纤截止 (nm)	1210	1280	1240	1210	1200
1550 nm 处的弯曲损耗, 10 mm 直径心轴 (dB/ 圈)	0.32	0.2	0.234	0.446	0.672

[0116] 表3: 示例性光纤分布的光学性质

	低模量涂层	高模量涂层	衰减 (dB/km)	光缆 截止 (nm)	MFD ( $\mu\text{m}$ )
[0117]					

玻璃直径 ( $\mu\text{m}$ )	直径 ( $\mu\text{m}$ )	直径 ( $\mu\text{m}$ )	1310 nm	1550 nm		1310 nm	1550 nm
125	NA	140	0.355	0.215	1240	9.38	10.64
125	133	142	0.324	0.191	1170	9.27	10.97
125	155	175	0.354	0.21	1140	9.41	10.61
115.5	NA	125	0.351	0.223			
125	NA	140	0.339	0.206	1170	9.06	
125	NA	140	0.344	0.221	1210		
125	NA	140	0.336	0.207	1200		
125	NA	140	0.339	0.206	1220	9.28	10.56
125	NA	155	0.333	0.214			
125	NA	132					
125	NA	140					
118	NA	121	0.964	2.01	1140	9.07	10.46
106	NA	125	0.874	4.32	980		
110	NA	126	0.581	1.238	1090	8.71	9.92
125	NA	132	0.596	0.775			
125	NA	140	0.551	0.747	1190	9.44	
125	NA	140	0.483	0.582		9.2	10.59
125	NA	155	0.439	0.413	1230		
125	NA	175	0.527	0.732	1170	9.46	10.51
125	155	175	0.42	0.284	1150	9.3	10.49

[0118] 纤芯区域

[0120] 纤芯区域包括二氧化硅玻璃。纤芯区域的二氧化硅玻璃可以是未掺杂的二氧化硅玻璃、正掺杂的二氧化硅玻璃和/或负掺杂的二氧化硅玻璃。正掺杂的二氧化硅玻璃包括掺杂了碱金属氧化物(例如,  $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{Li}_2\text{O}$ 、 $\text{Cs}_2\text{O}$ 或 $\text{Rb}_2\text{O}$ )的二氧化硅玻璃。负掺杂的二氧化硅玻璃包括掺杂了F的二氧化硅玻璃。在一个实施方式中,纤芯区域的二氧化硅玻璃可以不含Ge和/或不含Cl;也就是说,纤芯区域包括不含有Ge和/或Cl的二氧化硅玻璃。

[0121] 作为补充或替代,纤芯区域可以包括掺杂了至少一种碱金属(例如:锂(Li)、钠(Na)、钾(K)、铷(Rb)、铯(Cs)和/或钫(Fr))的二氧化硅玻璃。在一些实施方式中,二氧化硅玻璃掺杂了钠、钾和铷的组合。二氧化硅玻璃的峰值碱性物质浓度可以是如下范围:约10ppm至约500,或者约20ppm至约450ppm,或者约50ppm至约300ppm,或者约10ppm至约200ppm,或者约10ppm至约150ppm。以所公开的范围掺杂碱金属导致瑞利散射的下降,从而提供了较低的光纤衰减。

[0122] 在一些实施方式中,纤芯区域包括掺杂了碱金属和掺杂了作为负掺杂剂的F的二

氧化硅玻璃。光纤的纤芯中的F浓度是如下范围：约0.1重量%至约2.5重量%，或者约0.25重量%至约2.25重量%，或者约0.3重量%至约2.0重量%。

[0123] 在其他实施方式中，纤芯区域包括掺杂了Ge和/或Cl的二氧化硅玻璃。光纤的纤芯中的 $\text{GeO}_2$ 浓度可以是如下范围：约2.0至约8.0重量%，或者约3.0至约7.0重量%，或者约4.0至约6.5重量%。光纤的纤芯中的Cl浓度可以是如下范围：1.5重量%至6.0重量%，或者1.2重量%至5.5重量%，或者1.5重量%至5.0重量%，或者2.0重量%至4.5重量%，或者大于或等于1.5重量%（例如， $\geq 2$ 重量%、 $\geq 2.5$ 重量%、 $\geq 3$ 重量%、 $\geq 3.5$ 重量%、 $\geq 4$ 重量%、 $\geq 4.5$ 重量%、 $\geq 5$ 重量%等）。

[0124] 在纤芯基本不含Ge或Cl的实施方式中，纤芯区域的相对折射率 $\Delta_1$ 或 $\Delta_{1\max}$ 是如下范围：约-0.10%至约0.20%，或者约-0.05%至约0.15%，或者约0.0%至约0.10%。纤芯的最小相对折射率 $\Delta_{1\min}$ 是如下范围：约-0.20%至约-0.50%，或者约-0.30%至约-0.40%，或者约-0.32%至约-0.37%。 $\Delta_{1\max}$ 与 $\Delta_{1\min}$ 之差是：大于0.05%，或者大于0.10%，或者大于0.15%，或者大于0.20%，或者0.05%至0.40%的范围，或者0.10%至0.35%的范围。

[0125] 在纤芯掺杂了Ge和/或Cl的实施方式中，纤芯区域的相对折射率 $\Delta_1$ 或 $\Delta_{1\max}$ 是如下范围：约0.20%至约0.45%，或者约0.25%至约0.40%，或者约0.30%至约0.38%。纤芯的最小相对折射率 $\Delta_{1\min}$ 是如下范围：约-0.05%至约-0.05%，或者约-0.03%至约0.03%，或者约-0.02%至约0.02%。 $\Delta_{1\max}$ 与 $\Delta_{1\min}$ 之差是：大于0.20%，或者大于0.25%，或者大于0.30%，或者0.25%至0.45%的范围，或者0.30%至0.40%的范围。

[0126] 纤芯区域的半径 $r_1$ 是如下范围：约3.0微米至约6.0微米，或者约3.5微米至约6.0微米，或者约4.0微米至约6.0微米，或者约4.5微米至约5.5微米。在一些实施方式中，纤芯区域包括具有恒定或者近似恒定相对折射率的部分，其在径向方向上的宽度是：至少1.0微米，或者至少2.0微米，或者至少3.0微米，或者1.0微米至3.0微米的范围，或者2.0微米至3.0微米的范围。在一些实施方式中，纤芯区域具有恒定或者近似恒定相对折射率的部分具有相对折射率 $\Delta_{1\min}$ 。

[0127] 内包层区域

[0128] 在纤芯基本不含Ge和Cl的实施方式中，内包层区域包括掺杂了F的负掺杂的二氧化硅玻璃。内包层区域中的负掺杂剂的平均浓度大于纤芯区域中的负掺杂剂的平均浓度。

[0129] 内包层区域的相对折射率 $\Delta_2$ 或者 $\Delta_{2\max}$ 是如下范围：约-0.20%至约-0.50%，或者约-0.25%至约-0.45%，或者约-0.30%至约-0.40%，或者约-0.33%至约-0.37%。相对折射率 $\Delta_2$ 优选是恒定的或者近似恒定的。 $\Delta_{1\max} - \Delta_2$ 之差（或者 $\Delta_{1\max} - \Delta_{2\max}$ 之差）是：大于约0.25%，或者大于约0.30%，或者大于约0.35%，或者约0.25%至约0.45%的范围，或者约0.30%至约0.40%的范围。

[0130] 内包层区域的半径 $r_2$ 是如下范围：约7.0微米至约15.0微米，或者约7.5微米至约13.0微米，或者约8.0微米至约12.0微米，或者约8.5微米至约11.5微米，或者约9.0微米至约11.0微米，或者约9.5微米至约10.5微米。内包层区域的厚度 $r_2 - r_1$ 是如下范围：约3.0微米至约10.0微米，或者约4.0微米至约9.0微米，或者约4.5微米至约7.0微米。

[0131] 在纤芯掺杂了Ge和/或Cl的实施方式中，内包层区域包括基本不含Ge和/或Cl的二氧化硅。内包层区域的相对折射率 $\Delta_2$ 或者 $\Delta_{2\max}$ 是如下范围：约-0.05%至约-0.05%，或者约-0.03%至约0.03%，或者约-0.02%至约0.02%。相对折射率 $\Delta_2$ 优选是恒定的或者近似

恒定的。 $\Delta_{1\max} - \Delta_2$ 之差(或者 $\Delta_{1\max} - \Delta_{2\max}$ 之差)是:大于约0.20%,或者大于约0.25%,或者大于约0.30%,或者约0.25%至约0.40%的范围,或者约0.30%至约0.38%的范围。

[0132] 内包层区域的半径 $r_2$ 是如下范围:约8.0微米至约16.0微米,或者约9.0微米至约15.0微米,或者约10.0微米至约14.0微米,或者约10.5微米至约13.5微米,或者约11.0微米至约13.0微米。内包层区域的厚度 $r_2 - r_1$ 是如下范围:约3.0微米至约10.0微米,或者约4.0微米至约9.0微米,或者约5.0微米至约8.0微米。

[0133] 下陷折射率包层区域

[0134] 下陷折射率包层区域包括负掺杂的二氧化硅玻璃。如上文所讨论的那样,优选的负掺杂剂是氟。下陷折射率包层区域中的氟浓度是如下范围:约0.30重量%至约2.50重量%,或者约0.60重量%至约2.25重量%,或者约0.90重量%至约2.00重量%。

[0135] 相对折射率 $\Delta_3$ 或 $\Delta_{3\min}$ 是如下范围:约-0.30%至约-0.80%,或者约-0.40%至约-0.70%,或者约-0.50%至约-0.65%。相对折射率 $\Delta_3$ 优选是恒定的或者近似恒定的。 $\Delta_{1\max} - \Delta_3$ 之差(或者 $\Delta_{1\max} - \Delta_{3\min}$ 之差,或者 $\Delta_1 - \Delta_3$ 之差,或者 $\Delta_1 - \Delta_{3\min}$ 之差)是:大于约0.50%,或者大于约0.55%,或者大于约0.6%,或者约0.50%至约0.80%的范围,或者约0.55%至约0.75%的范围。 $\Delta_2 - \Delta_3$ 之差(或者 $\Delta_2 - \Delta_{3\min}$ 之差,或者 $\Delta_{2\max} - \Delta_3$ 之差,或者 $\Delta_{2\max} - \Delta_{3\min}$ 之差)是:大于约0.10%,或者大于约0.20%,或者大于约0.30%,或者约0.10%至约0.70%的范围,或者约0.20%至约0.65%的范围。

[0136] 下陷折射率包层区域的内半径是 $r_2$ ,并且具有上文规定的值。下陷折射率包层区域的外半径 $r_3$ 是如下范围:约10.0微米至20.0微米,或者约12.0微米至约19.5微米,或者约13.0微米至约19.0微米,或者约13.5微米至约18.5微米,或者约14.0微米至约18.0微米,或者约14.5微米至约17.5微米。下陷折射率包层区域的厚度 $r_3 - r_2$ 是如下范围:1.0微米至12.0微米,或者约2.0微米至约10.0微米,或者约2.5微米至约9.0微米,或者约3.0微米至约8.0微米。

[0137] 下陷折射率包层区域可以是偏移凹陷设计,具有如下凹陷体积:约30% $\Delta$ -微米<sup>2</sup>或更大,或者约50% $\Delta$ -微米<sup>2</sup>或更大,或者约75% $\Delta$ -微米<sup>2</sup>或更小,或者约30% $\Delta$ -微米<sup>2</sup>或更大且约75% $\Delta$ -微米<sup>2</sup>或更小,或者约50% $\Delta$ -微米<sup>2</sup>或更大且约75% $\Delta$ -微米<sup>2</sup>或更小。低于所公开范围的凹陷体积具有降低的弯曲性能,而高于所公开范围的凹陷体积不再以单模光纤运行。

[0138] 本文公开的偏移凹陷设计包括内包层区域。此外,本文公开的偏移凹槽设计提供了相比于与纤芯区域相邻的传统凹陷设计的优点。更具体来说,本文公开的偏移凹陷设计降低了基模的限制并为目标光纤模场直径和光缆截止特性提供了大弯曲直径(例如,弯曲直径>25mm)时改进的弯曲损耗。此外,本文公开的凹陷设计具有下陷折射率凹陷区域,其有利地限制了传播通过光纤的基本LP01模式的强度分布,从而降低了光纤模场直径。

[0139] 外包层区域

[0140] 在纤芯基本不含Ge和Cl的实施方式中,外包层区域包括负掺杂的二氧化硅玻璃。优选的负掺杂剂是氟。外包层区域中的氟浓度是如下范围:约0.30重量%至约2.20重量%,或者约0.60重量%至约2.00重量%,或者约0.90重量%至约1.80重量%。外包层区域的相对折射率 $\Delta_4$ 或者 $\Delta_{4\max}$ 是如下范围:约-0.20%至约-0.50%,或者约-0.25%至约-0.45%,或者约-0.30%至约-0.40%,或者约-0.33%至约0.37%。相对折射率 $\Delta_4$ 优选是恒定的或

者近似恒定的。如图5所示,相对折射率 $\Delta_4$ 可以近似等于相对折射率 $\Delta_2$ 。

[0141] 在实施方式中,外包层是基本纯的二氧化硅。或者,外包层可以掺杂C1至如下范围的相对折射率:约0.01至约0.1%,或者约0.02%至约0.08%,或者约0.03%至约0.06%。外包层中的C1浓度可以是如下范围:约0.1重量%至约1.0重量%,约0.2重量%至约0.8重量%,或者约0.3重量%至约0.6重量%。或者,外包层可以掺杂氧化钛来强化包层表面从而阻止诸如划痕之类的缺陷传播通过光纤。在一些实施方式中,外包层可以掺杂约5重量%至约25重量%的氧化钛浓度。

[0142] 外包层区域的内半径是 $r_3$ ,并且具有上文规定的值。在一些实施方式中,外半径 $r_4$ 约为62.5微米从而有助于采用包层对齐拼接件与常规125微米包层直径光纤进行拼接。外包层区域的外半径 $r_4$ 是如下范围:60.0微米至65.0微米,或者61.0微米至64.0微米,或者62.0微米至63.0微米,或者62.25微米至62.75微米。因此,例如,包层区域的直径(即,外半径 $r_4$ 乘以2)是如下范围:120.0微米至130.0微米,或者122.0微米至128.0微米,或者124.0微米至126.0微米,或者124.5微米至125.5微米。外包层区域的厚度 $r_4 - r_3$ 是如下范围:约20.0微米至约60.0微米,或者约30.0微米至约55.0微米,或者约40.0微米至约50.0微米。在一些实施方式中,外半径 $r_4$ 约为50微米从而实现低模量和高模量涂层的厚度增加。外包层区域的外半径 $r_4$ 是如下范围:45.0微米至55.0微米,或者49.0微米至51.0微米,或者49.5微米至50.5微米,或者49.65微米至50.35微米。因此,例如,包层区域的直径(即,外半径 $r_4$ 乘以2)是如下范围:90.0微米至110.0微米,或者98.0微米至102.0微米,或者99.0微米至101.0微米,或者99.3微米至100.7微米。外包层区域的厚度 $r_4 - r_3$ 是如下范围:约20.0微米至约50.0微米,或者约25.0微米至约45.0微米,或者约30.0微米至约40.0微米。

[0143] 光纤特性

[0144] 根据本公开内容实施方式的光纤可以具有如下范围的模场直径:1310nm处约9.0微米至约10.0微米以及1550nm处约10.0微米至约11.0微米,光缆截止小于约1520nm。在一些实施方式中,22米光缆截止波长是:小于约1550nm,或者小于约1450nm,或者小于约1400nm,或者小于约1300nm,或者小于约1260nm。在一些实施方式中,2米光纤截止波长是:小于约1520nm,或者小于约1500nm,或者小于约1450nm,或者小于约1400nm,或者小于约1300nm,或者小于约1260nm。

[0145] 此外,根据本公开内容实施方式的光纤在1550nm处可以具有如下有效面积:大于约75.0微米<sup>2</sup>,大于约80微米<sup>2</sup>,或者大于约85微米<sup>2</sup>,或者约75微米<sup>2</sup>至约95微米<sup>2</sup>的范围,或者约80微米<sup>2</sup>至约90微米<sup>2</sup>的范围,或者约85微米<sup>2</sup>至约90微米<sup>2</sup>的范围。

[0146] 本文公开的光纤的衰减是:1310nm波长处小于或等于0.36dB/km,或者小于或等于0.30dB/km,或者小于或等于0.28dB/km,或者1310nm波长处小于或等于0.26dB/km。在1550nm波长处,本文公开的光纤的衰减是:小于或等于0.24dB/km,或者小于或等于0.22dB/km,或者小于或等于0.20dB/km。

[0147] 如图5所示,光纤60提供了具有碱性物质掺杂的纤芯的光纤的示例性实施方式,纤芯区域(1)的相对折射率 $\Delta_1$ 是约-0.3%至约-0.42%,以及纤芯半径( $r_1$ )是约4微米至约6.5微米。此外,光纤60的内包层区域厚度是约2微米至约12微米。光纤60具有凹陷体积为54.5% $\Delta$ -微米<sup>2</sup>的偏移凹陷设计。光纤60的包层是氟掺杂的,以及下限折射率包层区域具有约17.5微米的半径( $r_3$ )。下表4显示了光纤60的光学性质。

[0148] 表4:光纤60的光学性质

	模场直径 (1310 nm 处)	9.22 微米
	模场直径 (1550 nm 处)	10.27 微米
	模场直径 (1625 nm 处)	10.61 微米
[0149]	零色散波长	1319 nm
	光缆截止	1315 nm
	凹陷体积	54.5% $\Delta$ -微米 <sup>2</sup>
	15 mm 直径弯曲损耗	0.04 dB/圈
	20 mm 直径弯曲损耗	0.009 dB/圈

[0150]	30 mm 直径弯曲损耗	0.001 dB/圈
--------	--------------	------------

[0151] 图6显示光纤(64和65)的第二和第三示例性实施方式,具有碱性物质掺杂的纤芯以及大于约50% $\Delta$ -微米<sup>2</sup>的凹陷体积,以及其中,包层是氟掺杂的且下限折射率包层区域具有约17.5微米的半径( $r_3$ )。如下表5所示,光纤64导致1310nm处9.07微米的模场直径,而光纤65导致1310nm处9.39微米的模场直径。下表2显示了光纤64和65的光学性质。

[0152] 表5:光纤64和65的光学性质

[0153]	光纤64	光纤65
	模场直径(1310nm处)	9.07微米
	模场直径(1550nm处)	10.08微米
	模场直径(1625nm处)	10.41微米
	零色散波长	1319nm
	光缆截止	1419nm
	凹陷体积	55% $\Delta$ -微米 <sup>2</sup>
	15mm直径弯曲损耗	0.0137dB/圈
	20mm直径弯曲损耗	0.0003dB/圈
	30mm直径弯曲损耗	0.0002dB/圈

[0154] 图7显示光纤66的实施方式,具有Ge掺杂纤芯,大于50% $\Delta$ -微米<sup>2</sup>的凹陷体积,以及其中,内和包层区域是基本纯二氧化硅以及下陷折射率包层区域具有约16.8微米的半径( $r_3$ )。如下表6所示,光纤64导致1550nm波长处10.6微米的模场直径。下表6显示光纤66的折射率分布参数和光学性质。

[0155] 表6:光纤66的光学性质

		光纤
[0156]	$\Delta_1$ (%)	0.35
	$r_1$ (微米)	5.35
	纤芯 $\alpha$	3.0
	$\Delta_2$ (%)	0.01
	$r_2$ (微米)	12.0
	$\Delta_3$ (%)	-0.46
	$r_3$ (微米)	16.8
	$V_3$ (%-微米 <sup>2</sup> )	63.6
	$r_4$ (微米)	62.5
	$r_6$ (微米)	80.9
	1550 nm 处的 MFD (微米)	10.6
[0157]	1550 nm 处的 $A_{\text{eff}}$ (微米 <sup>2</sup> )	85.5
	1550 nm 处的色散 (ps/nm/km)	18.3
	1310 nm 处的色散 (ps/nm/km)	0.38
	零色散波长 (nm)	1306
	1550 nm 处的衰减 (dB/km)	0.23
	22 m 光缆截止波长 (nm)	1287
	2 m 光纤截止波长 (nm)	1338
	1550 nm 处的 1 x 10 mm 直径宏弯曲损耗 (dB)	0.6
	1550 nm 处的 1 x 15 mm 直径宏弯曲损耗 (dB)	0.07

[0158] 光纤60、64、65和66的偏移凹陷设计为本文公开的较小直径的光纤提供了改进的弯曲性能。更具体来说，本文公开的偏移凹陷设计提供了紧凑形式下的低衰减、大有效面积和低弯曲损耗，具有约125微米的包层直径和小于175微米的外涂层直径。

[0159] 涂层性质

[0160] 光穿过光纤的传递系数高度取决于施涂到玻璃纤维的涂层的性质。如上文所讨论的那样(且参照图4)，涂层可以包括任意的低模量内涂层56以及高模量涂层58，其中，高模量涂层围绕任意的低模量内涂层以及任意的低模量内涂层接触玻璃纤维(其包括被包层区域围绕的中心纤芯区域)。任意的颜料外涂料层(例如，墨层)围绕并直接接触高模量涂层。

[0161] 高模量涂层58是比任意的低模量涂层56硬的材料(更高的杨氏模量)，并且设计成用来保护玻璃纤维免受光纤的加工、搬运和部署过程中的磨损或外部作用力所导致的损

坏。任选的低模量内涂层56是比高模量涂层58软的材料(更低的杨氏模量),并且设计成用于缓冲或消散由于施加到高模量涂层的外表面的作用力所导致的应力。任选的低模量涂层可以帮助消散掉由于当布置在光缆中的时候光纤所遭遇的微弯曲所引起的应力,但是对于短长度应用(例如,光学互联件)不是必需的。需要使得传递到玻璃纤维的微弯曲应力最小化,因为微弯曲应力产生了玻璃纤维的折射率分布中的局部扰动。局部折射率扰动导致传输通过玻璃纤维的光的强度损失。通过消散掉应力,任选的低模量涂层使得由于微弯曲所导致的强度损失最小化。

[0162] 认为光纤上较薄的涂层增加了微弯曲损耗,因为其对于外部扰动所提供的保护较小。这些扰动导致纤芯中引导的光(纤芯模)功率耦合到包层中的更高阶模(包层模)。如图10所示,包层模与具有高吸收的涂料层会具有明显重叠。这种耦合以及涂料材料的吸收过程导致光学功率损失。

[0163] 如下文章公开了对涂层性质与光纤的微弯曲损耗进行量化的方案,J.Baldauf, N.Okada和M.Miyamoto的题为“Relationship of Mechanical Characteristics of Dual Coated Single Mode Fibers and Microbending Loss(双涂覆单模光纤的机械特性与微弯曲损耗的关系)”的文章,IEICE通信事务,第E76-B卷,第4期,第352-357页(1993年4月)。作者引入了参数 $x_s$ ,这是使得次级(高模量)涂层与玻璃纤维耦合的作用力的有效弹簧常数。这个弹簧常数参数化提供了强化指导,即:具有低模量的厚的初级(低模量)涂层提供更好的微弯曲性能,但是它没有完全捕捉到玻璃和高模量涂层的贡献。

[0164] 玻璃、低模量内涂层和高模量涂层的角色组合导致如下微弯曲衰减惩罚(MAP):

$$[0165] \quad MAP = C_0 f_0 \sigma \frac{f_{RIP} f_g(E_g, R_g) f_p(E_p, t_p)}{f_{CS} \left( \frac{E_s}{E_p}, R_s, t_s \right)} \quad (8)$$

[0166] 式中, $f_0$ 和 $\sigma$ 分别是平均横向压力和与高模量涂层接触的外表面的粗糙度的标准偏差,以及 $C_0 = 4 \times 10^{25} \left[ \left( \frac{\pi}{4} \right)^{2.65} \right]^{-1}$ 。

[0167]  $f_{RIP}$ 考虑了折射率分布的角色并且是阶数统一的(order unity)。衰减数据表明,对于具有步阶式折射率分布的单模光纤, $f_{RIP}$ 近似为1.0;以及对于具有在包层中包含下陷折射率凹陷的折射率分布的弯曲不敏感单模光纤,约为0.5。等式8中的其他三项是玻璃、低模量内涂层以及包含低模量内涂层和高模量涂层的体系对于微弯曲相应的贡献,并且如下:

$$[0168] \quad f_g = \frac{1}{E_g^2 R_g^6},$$

$$[0169] \quad f_p = \frac{E_p}{t_p^3},$$

$$[0170] \quad \text{以及 } f_{cs} = \left[ 1 + \frac{E_p}{E_g} \left( \frac{t_s}{R_s} \right)^3 \right]^{0.375} \left\{ \frac{E_p}{E_g} [R_s^4 - (R_s - t_s)^4] \right\}^{0.625},$$

[0171] 式中, $R_g$ 是玻璃的半径(即,外包层区域的外半径), $R_s$ 是高模量外涂层的外半径, $t_p$ 是低模量内涂层的厚度, $t_s$ 是高模量外涂层的厚度,以及 $E_g$ 、 $E_p$ 和 $E_s$ 分别是玻璃、低模量内涂

层和高模量涂层的弹性模量。当模量和半径的单位分别是GPa和微米时,MAP的单位为dB/km。低模量内涂层系数 $f_p$ 取决于 $(1/t_p)^2$ 而不仅仅是 $1/t_p$ (这是弹簧常数参数化预测的情况)。 $f_{cs}$ 涂层体系系数对于具有较薄涂层的光纤是令人感兴趣的,因为当高模量涂层较厚时( $t_s$ 大于约20微米)其非常大,这对应于低MAP。然而,当高模量涂层厚度 $t_s$ 小于约10微米时,它变得相当小且得到大于0.01dB/km的MAP值,这是外涂层的刚度下降的结果。假设没有任何微弯曲衰减惩罚情况下光纤衰减近似为0.19dB.km,从而经涂覆的光纤体系的净衰减为0.19dB/km加上微弯曲衰减惩罚。

[0172] 发明人发现,如果涂层低于某一厚度(如本文所述),则可以降低微弯曲损耗。如图11所示,当聚合物涂层的厚度充分下降时,在涂料层中存在抗共振效应,这使得没有在涂料层中引导光。这种抗共振效应显著降低了涂料层的吸收,从而降低了微弯曲损耗。大于37微米的常规涂层厚度对于抗共振效应而言太大。为了产生这种抗共振效应,聚合物涂层的总厚度小于25微米,更优选小于20微米,并且甚至更优选小于10微米。在一些实施方式中,聚合物涂层的总厚度是:约2微米至约25微米,或者约2微米至约20微米,或者约2微米至约15微米,或者约2微米至约10微米,或者约2微米至约5微米。

[0173] 如本文所用,术语“穿刺负荷”指的是撞击到如本文所述的光纤的涂层上的作用力量。如本文所用,术语“抗穿刺性”指的是来自光纤涂层的与穿刺负荷相对的作用力。如下文进一步所述,当穿刺负荷超过涂层的最大抗穿刺性时,涂层会破裂。对于抗穿刺性,Glaesemann和Clark在文章“Quantifying the Puncture Resistance of Optical Fiber Coatings (对光纤涂层的抗穿刺性的量化)”(Proc.第52届IWCS,第237-245页(1993))中对于具有一种类型的涂层的光纤的分析表明,抗穿刺性对于高模量涂层的横截面面积 $A_s$ 具有线性依赖性。这篇论文中的分析假设抗穿刺性是由于高模量涂层上的环向应力,它们将其建模为经受来自低模量内涂层的内部压力的薄圆柱体。然而,对于大多数的光纤,高模量涂层的厚度 $t_s$ 与外半径 $r_6$ 之比约为10%的数量级,所以光纤的低模量涂层可以近似为厚壁圆柱体,压力 $P_0$ 来自外部且传递穿刺负荷。在外部压力远大于来自低模量内涂层的内部压力的极限情况下,最大环向应力为 $\sigma_\theta = \frac{-2R_s^2 P_0}{(R_s^2 - R_p^2)} = \frac{-2\pi R_s^2 P_0}{A_s^2}$ ,式中, $A_s$ 是高模量涂层的横截面

面积。观察到这种环向应力对于 $A_s$ 具有逆相关性,则抗穿刺性是 $P_R = P_0 + C_1 E_s A_s$ ,式中, $E_s$ 是高模量涂层的模量,以及系数 $P_0$ 和 $C_1$ 的数值分别约为11.3g和2.1g/MPa/mm<sup>2</sup>。

[0174] 涂层实施例:制备和测量技术

[0175] 采用下文所述的测量技术确定本文公开的任选的低模量内涂层和高模量涂层的性质:

[0176] 拉伸性质。可固化的高模量涂料组合物固化并构造成固化棒样品的形式用于测量杨氏模量、屈服拉伸强度、屈服强度和屈服伸长。通过将可固化的高模量涂料组合物注入到内直径约为0.025”的Teflon®管中,以制备固化棒。采用Fusion D灯泡(Fusion D bulb)以约为2.4J/cm<sup>2</sup>(通过购自国际光公司(International Light)的Light Bug型号IL390在225-424nm的波长范围上测量)的剂量固化棒样品。在固化后,剥除Teflon®管,以提供高模量涂料组合物的固化棒样品。在测试之前,固化的棒在23℃和50%相对湿度的条件下放置18-24小时。采用Sintech MTS拉伸测试仪,在标距长度为51mm的无缺陷棒样品上测量杨氏

模量、断裂拉伸强度、屈服强度和屈服伸长,测试速度为250mm/分钟。根据ASTM标准D882-97测量拉伸性质。以至少五个样品的平均值确定性质,取平均值时排除有缺陷的样品。

[0177] 原位玻璃转化温度。对于从具有被高模量涂层围绕的低模量内涂层的光纤获得的光纤管剥除样品进行原位Tg测量。经过涂覆的光纤包括:直径为125微米的玻璃纤维,围绕且直接接触玻璃纤维的厚度为32.5微米的低模量内涂层,以及围绕且直接接触玻璃纤维的厚度为26.0微米的高模量涂层。对于所有测量的样品,玻璃纤维和低模量内涂层都是相同的。从下文所述的参考低模量内涂层组合物形成低模量内涂层。对具有比较例高模量涂层和根据本公开内容的高模量涂层的样品进行测量。

[0178] 采用如下方案获得剥除光纤管的样品:0.0055”米勒剥离器被夹在距离经过涂覆的光纤端部大约1英寸处。将光纤的该1英寸区域投入液氮流中,并在液氮中保持3秒。然后从液氮流取出经过涂覆的光纤,并快速剥离以去除涂层。检查光纤的剥离端是否有残留涂层。如果在玻璃纤维上留有残留涂层,则丢弃该样品并制备新的样品。剥除过程的结果是干净的玻璃纤维以及剥除的涂层的空心管(其包括完好的低模量内涂层和高模量涂层)。空心管被称作“管剥除样品”。从未剥离光纤的端面测量玻璃、低模量内涂层和高模量涂层的直径。

[0179] 以9至10mm的样品标距长度,采用Rheometrics DMTA IV测试仪器来运行管剥除样品的原位Tg。将管剥除样品的宽度、厚度和长度输入到测试仪器的运行程序中。安装管剥除样品,然后冷却到约-85°C。一旦稳定之后,采用如下参数运行升温:

[0180] 频率:1Hz

[0181] 应变:0.3%

[0182] 加热速率:2°C/分钟

[0183] 最终温度:150°C

[0184] 初始静力=20.0g

[0185] 静态力比动态力大10.0%

[0186] 将涂层的原位Tg定义为 $\tan\delta$ 与温度的函数图中的 $\tan\delta$ 的最大值,其中, $\tan\delta$ 定义为:

[0187]  $\tan\delta = E''/E'$

[0188] 以及 $E''$ 是损耗模量,随着变形循环中的加热,其与能量损耗成比例,以及 $E'$ 是储能模量或弹性模量,其与变形循环中储存的能量成比例。

[0189] 对于低模量内涂层和高模量涂层,管剥除样品在 $\tan\delta$ 图中展现出不同的最大值。在较低温度(约-50°C)时的最大值对应于低模量内涂层的原位Tg,而在较高温度(大于50°C)时的最大值对应于高模量涂层的原位Tg。

[0190] 低模量内涂层的原位模量。在包含这种任选的涂料层的实施方式中,采用如下方案测量原位模量。获得光纤的6英寸样品,并从光纤的中心窗口剥除一英寸的区段,并用异丙醇擦拭。将窗口剥除的光纤安装到装配有10mm x 5mm矩形铝片的样品支架/对准站,其用于固定光纤。两片水平取向并放置成使得短的5mm侧相对并间隔5mm间隙。窗口剥除的光纤水平放在样品支架上跨过所述片以及将片分隔开的间隙。光纤的窗口剥除区域的一侧的涂覆端放在一个片上并延伸一半进入片之间的5mm间隙中。一英寸窗口剥除区域在余下的一半间隙上延伸并跨过相对的片。在对准之后,取出样品,并向每个片最靠近5mm间隙的那一

半施涂小的胶水点。然后,光纤返回至位置并且对齐工作台升高直到胶水正好触碰到光纤。然后通过胶牵拉涂覆端远离间隙,使得片之间的5mm间隙中的大部分被光纤的窗口剥除区域占据。窗口剥除区域留在相对片上的部分与胶水接触。使涂覆端的最顶端延伸超过片并进入片之间的间隙中。涂覆端的这个部分没有嵌入胶水中,并且是进行原位模量测量的物体。使胶水干燥,处于这个构造的光纤样品使得光纤与片固定。在干燥之后,将与每个片固定的光纤的长度修整成5mm。测量嵌入胶水中的涂覆长度、未嵌入的涂覆长度(延伸进入片之间的间隙中的部分)和初级直径(primary diameter)。

[0191] 在Rheometrics DMTA IV动态机械测试设备上,以恒定的 $9e-6$  1/s的应变持续45分钟的时间在室温(21℃)下进行原位模量测量。标距长度为15mm。记录作用力和长度变化,并用于计算低模量涂层的原位模量。通过从片去除任意会干扰测试设备的15mm夹持长度的环氧化物来制备安装了片的光纤样品,以确保夹具与光纤之间没有接触,并且确保样品与夹具方形地固定。仪器作用力清零。然后,将与光纤的未涂覆端固定的片安装到测试设备的下夹具(测量探针),以及将与光纤的涂覆端固定的片安装到测试设备的上(固定)夹具。然后进行测试,一旦完成分析取出样品。

[0192] 高模量涂层的原位模量。对于高模量涂层,采用由光纤样品制备的光纤管剥除(fiber tube-off)样品来测量原位模量。将0.0055英寸米勒剥离器(miller stripper)夹持到光纤样品的端部下方向约1英寸处。将光纤样品的这个1英寸区域浸入液氮流中,并保持3秒。然后取出光纤样品并快速进行剥离。然后检查光纤样品的剥离端。如果涂层留在光纤样品的玻璃部分上,则脱管样品视作有缺陷的,并制备新的脱管样品。合适的脱管样品是清楚地剥离了玻璃并且由低模量内涂层和高模量涂层的中空管构成的那种。从未剥离光纤样品的端面测量玻璃、低模量内涂层和高模量涂层的直径。

[0193] 采用Rheometrics DMTA IV仪器,以11mm的样品标距长度运行光纤脱管样品,以获得高模量涂层的原位模量。确定宽度、厚度和长度,并作为输入提供到仪器的操作软件。安装样品,并采用时基扫描程序在环境温度(21℃)运行,参数如下:

[0194] 频率:1转/秒

[0195] 应变:0.3%

[0196] 总时间=120秒

[0197] 每次测量的时间=1秒

[0198] 初始静力=15.0g

[0199] 静态力比动态力大10.0%

[0200] 一旦完成,对最后5个 $E'$ (储存模量)数据点取平均值。每个样品运行3次(每次运行新鲜样品),总共15个数据点。记录3次运行的平均值。

[0201] 高模量涂层的抗穿刺性。对包含玻璃纤维以及被高模量涂层围绕的低模量内涂层的样品进行抗穿刺性测量。玻璃纤维的包层直径是125微米。从下表1所列出的参考低模量内涂层组合物形成低模量内涂层。如下文所述制备具有各种高模量涂层的样品。对低模量内涂层和高模量涂层的厚度进行调节以改变高模量涂层的横截面面积,如下文所述。对于所有样品,高模量涂层的厚度与低模量内涂层的厚度之比维持在约0.8。

[0202] 采用G.Scott Glaesemann和Donald A.Clark发表在第52届国际电线和光缆研讨会论文集,第237-245页的题为“量化光纤涂层的耐穿刺性(Quantifying the Puncture

Resistance of Optical Fiber Coatings)”(2003)的文章中描述的技术来测量耐穿刺性,其通过引用结合入本文。本文提供了该方法的简述。该方法是压痕方法。将4厘米长的光纤放置在3mm厚的载玻片上。光纤的一端附连到实现了光纤以受控方式转动的装置。在100倍放大倍数下检查光纤的透射率并旋转,直到玻璃纤维的两侧平行于载玻片的方向上的高模量涂层厚度相等。在这个位置,光纤的两侧上平行于载玻片的方向上的高模量涂层的厚度是相同的。高模量涂层在垂直于载玻片且高于或低于玻璃纤维上的厚度与平行于载玻片的方向上的高模量涂层的厚度是不同的。垂直于载玻片的方向上的一个厚度大于平行于载玻片的方向上的厚度,而垂直于载玻片的方向上的另一个厚度小于平行于载玻片的方向上的厚度。通过将光纤固定贴在载玻片的两端来固定光纤的这个位置,并且这个位置是用于压痕测试的光纤位置。

[0203] 采用通用测试机器(Instron型号5500R或者等价物)来进行压痕。将倒置显微镜放置在测试机器的十字头下方。显微镜的物镜位于安装在测试机器中具有75°夹角的金刚石楔形压头的正下方。将贴有光纤的载玻片放在显微镜工作台上,并且位于压头的正下方,从而压头楔形物的宽度与光纤的方向垂直。在光纤放置好之后,钻石楔形物下探直到与高模量涂层的表面接触。然后,钻石楔形物受驱动以0.1mm/分钟的速率进入到高模量涂层中,并测量高模量涂层上的负荷。随着钻石楔形物受驱动更深入到高模量涂层中,高模量涂层上的负荷增加,直到发生穿刺,在这时,观察到负荷的急剧减小。记录观察到穿刺时的压痕负荷并在本文中记录为克作用力(g),在本文中被称作“穿刺负荷”。光纤以相同的取向重复进行实验以获得10个测量点,对其取平均值来确定该取向的穿刺负荷。通过光纤取向转动180°来获得第二组的10个测量点。

[0204] 宏弯曲损耗。采用标准IEC 60793-1-47所规定的心轴缠绕测试来确定宏弯曲损耗。在心轴缠绕测试中,光纤在具有规定直径的圆柱形心轴上缠绕一次或多次,确定由于弯曲导致的规定波长处的衰减增加。心轴缠绕测试中的衰减的单位为dB/圈,其中一圈指的是光纤绕着心轴一次回转。对于下文所述的选定的例子,采用直径为10mm、15mm和20mm的心轴来确定1310nm、1550nm和1625nm波长处的宏弯曲损耗。

[0205] 具有被高模量涂层围绕的低模量内涂层的光纤的示例性实施方式

[0206] 可以对任选的低模量内涂层56以及高模量涂层58的具体性质进行调节从而为本文公开的小直径光纤提供足够的牢固度和良好的微弯曲性能。例如,低模量内涂层56可以具有低的杨氏模量和/或低的原位模量。低模量内涂层的杨氏模量是:小于或等于约0.7MPa,或者小于或等于约0.6MPa,或者小于或等于约0.5MPa,或者小于或等于约0.4MPa,或者约0.1MPa至约0.7MPa的范围,或者约0.1MPa至约0.4MPa的范围。低模量内涂层56的原位模量是:小于或等于约0.5MPa,或者小于或等于约0.3MPa,或者小于或等于约0.25MPa,或者小于或等于约0.20MPa,或者小于或等于约0.15MPa,或者小于或等于约0.10MPa,或者约0.05MPa至约0.25MPa的范围,或者约0.10MPa至约0.20MPa的范围。

[0207] 优选地,低模量内涂层56的折射率高于玻璃纤维的包层区域50,从而允许其将错误的光信号从纤芯区域48剥离。低模量内涂层56应当在热老化和水解老化过程中保持与玻璃纤维充分的粘附,但是出于拼接目的又是能够从玻璃纤维剥离的。

[0208] 为了有助于更小直径的光纤,低模量内涂层可以缺失或者具有的厚度小于用于常规光纤中的低模量内涂层。高模量涂层58可以具有相比于常规光纤而言较小厚度和较小的

横截面面积。然而,高模量涂层58必须仍然维持海底光缆和中继器中的高可靠性所需的牢固度和抗穿刺性。随着高模量涂层厚度的减小,其保护功能下降。抗穿刺性是对于(包含高模量涂层和任选的颜料外涂层的)外涂层的横截面面积的保护功能的测量。具有更高的耐穿刺性的高模量涂层经受住更高的磨损压力而不发生失效,并且为玻璃纤维提供了更好的保护。

[0209] 为了提供所需要的牢固度和耐穿刺性,高模量涂层58可以具有如下原位模量:大于约1500MPa,或者大于约1600MPa,或者大于约1800MPa,或者大于约2200MPa,或者大于约2500MPa,或者大于约2600MPa,或者大于约2700MPa,或者约1500MPa至约3000MPa的范围,或者约1800MPa至约2800MPa的范围,或者约2000MPa至约2800MPa的范围,或者约2400MPa至约2800MPa的范围。

[0210] 为了进一步提供所需的牢固度和抗穿刺性,高模量涂层58的横截面面积与原位模量的乘积可以是:大于约10N,大于约12.5N,大于约15N,大于约20N,大于约25N,大于约30N,或者约10N至30N的范围内,或者约15N至约30N的范围内,或者约20N至约30N的范围内,或者约25N至约30N的范围内。

[0211] 为了提供所需的低(好的)微弯曲性能和抗穿刺性的组合,高模量涂层58的原位模量与低模量涂层58的原位模量之比可以是:大于约4000,或者大于约5000,或者大于约6000,或者大于约7000,或者大于约8000,或者大于约9000,或者大于约10,000,或者约4000至约10,000的范围内,或者约4000至约10,000的范围内,或者约5000至约10,000的范围内,或者约6000至约10,000的范围内,或者约7000至约10,000的范围内,或者约8000至约10,000的范围内。

[0212] 通常通过向玻璃纤维施涂作为粘性液体的可固化涂料组合物并固化形成低模量和高模量涂层。光纤还可以包括围绕高模量涂层的颜料外涂层。颜料外涂层可以包括着色剂,出于识别鉴定目的来对光纤进行标记,并且通常杨氏模量类似于高模量涂层的杨氏模量。

[0213] 高模量涂层58可以包含三官能单体。高模量涂层58的玻璃转化温度( $T_g$ )可以是:大于约50°C,或者大于约60°C,或者大于约70°C,或者大于约80°C,或者大于约90°C,或者大于约100°C。

[0214] 可以使用合适的低模量内涂层56和高模量涂层58使得当高模量涂层的横截面面积小于约10,000微米<sup>2</sup>时,光纤46具有如下抗穿刺性:大于或等于约28g,或者大于或等于约30g,或者大于或等于约32g,或者大于或等于约34g,或者大于或等于约36g,或者大于或等于约38g,或者大于或等于约40g。

[0215] 可以使用合适的低模量内涂层56和高模量涂层58使得当高模量涂层的横截面面积小于约8,000微米<sup>2</sup>时,光纤46具有如下抗穿刺性:大于或等于约22g,或者大于或等于约24g,或者大于或等于约26g,或者大于或等于约28g,或者大于或等于约30g。

[0216] 图19显示光纤的微弯曲衰减惩罚(MAP)与低模量内涂层厚度的关系,所述光纤具有:步阶状折射率和凹陷辅助分布(例如,如上表2所示),100微米的包层直径,模量为1200MPa且外半径为82.5微米的高模量涂层,以及模量为0.5MPa的低模量内涂层。如图19和表7a所示,当光纤具有凹陷辅助分布、约100微米包层直径以及约10微米至约26微米的低模量内涂层厚度时,可以实现小于0.1dB/km的MAP。还对具有步阶状和凹陷辅助分布、125微米

包层直径、1200MPa模量和82.5微米外半径的高模量涂层以及0.5MPa模量的低模量内涂层的光纤进行了计算。如表7b所示,当光纤具有凹陷辅助分布、约125微米包层直径以及约8微米至约17微米的低模量内涂层厚度时,可以实现小于0.1dB/km的MAP。

[0217] 表7a:具有步阶状和凹陷辅助分布以及包层直径为100微米、 $E_p=0.5\text{MPa}$ 且 $E_s=1200\text{MPa}$ 的光纤的MAP

[0218]

玻璃半径 $R_g$ (微米)	低模量内涂层 厚度 $t_p$ (微米)	低模量内涂 层半径 $R_p$ (微米)	高模量涂层半径 $R_s$ (微米)	高模量涂层厚 度 $t_s$ (微米)	步阶状分 布的 MAP (dB/km)	凹陷辅助分 布的 MAP (dB/km)
50	5	55	82.5	27.5	0.522	0.261
50	6	56	82.5	26.5	0.382	0.191
50	7	57	82.5	25.5	0.297	0.148
50	8	58	82.5	24.5	0.241	0.120
50	9	59	82.5	23.5	0.202	0.101
50	10	60	82.5	22.5	0.174	0.087
50	11	61	82.5	21.5	0.154	0.077
50	12	62	82.5	20.5	0.139	0.069

[0219]

50	13	63	82.5	19.5	0.128	0.064
50	14	64	82.5	18.5	0.119	0.059
50	15	65	82.5	17.5	0.113	0.056
50	16	66	82.5	16.5	0.108	0.054
50	17	67	82.5	15.5	0.105	0.053
50	18	68	82.5	14.5	0.104	0.052
50	19	69	82.5	13.5	0.104	0.052
50	20	70	82.5	12.5	0.105	0.052
50	21	71	82.5	11.5	0.108	0.054
50	22	72	82.5	10.5	0.112	0.056
50	23	73	82.5	9.5	0.118	0.059
50	24	74	82.5	8.5	0.126	0.063
50	25	75	82.5	7.5	0.137	0.069
50	26	76	82.5	6.5	0.151	0.075
50	27	77	82.5	5.5	0.168	0.084
50	28	78	82.5	4.5	0.189	0.094
50	29	79	82.5	3.5	0.216	0.108
50	30	80	82.5	2.5	0.256	0.128
50	31	81	82.5	1.5	0.333	0.166

[0220] 表7b:具有步阶状和凹陷辅助分布以及包层直径为125微米、 $E_p=0.5\text{MPa}$ 且 $E_s=$

1200MPa的光纤的MAP

	玻璃半径 R <sub>g</sub> (微米)	低模量内涂层 厚度 t <sub>p</sub> (微米)	低模量内涂 层半径 R <sub>p</sub> (微米)	高模量涂层半径 R-s (微米)	高模量涂层厚 度 t-s (微米)	步阶状分 布的 MAP (dB/km)	凹陷辅助分 布的 MAP (dB/km)
[0221]	62.5	5	67.5	82.5	15	0.335	0.167
	62.5	6	68.5	82.5	14	0.258	0.129
	62.5	7	69.5	82.5	13	0.212	0.106
	62.5	8	70.5	82.5	12	0.183	0.091
	62.5	9	71.5	82.5	11	0.164	0.082
	62.5	10	72.5	82.5	10	0.152	0.076
	62.5	11	73.5	82.5	9	0.146	0.073
	62.5	12	74.5	82.5	8	0.143	0.072
	62.5	13	75.5	82.5	7	0.145	0.072
[0222]	62.5	14	76.5	82.5	6	0.149	0.075
	62.5	15	77.5	82.5	5	0.157	0.078
	62.5	16	78.5	82.5	4	0.168	0.084
	62.5	17	79.5	82.5	3	0.185	0.092
	62.5	18	80.5	82.5	2	0.216	0.108
	62.5	19	81.5	82.5	1	0.299	0.149

[0223] 图20显示光纤的MAP与低模量内涂层厚度的关系,所述光纤具有:凹陷辅助光纤分布(例如,如上表2所示),100微米的包层直径,模量为0.5MPa的低模量内涂层,以及模量为1.2、1.6和2.0GPa的高模量涂层。如图20和表8a所示,当高模量涂层具有1.6GPa的模量以及低模量内涂层的厚度是约8至约29微米时,可以实现小于0.1dB/km的MAP。当高模量涂层具有1.6GPa的模量以及低模量内涂层的厚度是约13至约24微米时,可以实现小于0.05dB/km的MAP。当高模量涂层具有2.0GPa的模量以及低模量内涂层的厚度是约7至约30微米时,可以实现小于0.1dB/km的MAP。当高模量涂层具有2.0GPa的模量以及低模量内涂层的厚度是约11至约26微米时,可以实现小于0.05dB/km的MAP。还对具有凹陷辅助分布、125微米包层直径、模量为0.5MPa的低模量内涂层以及模量为1.2、1.6和2.0GPa的高模量涂层的光纤进行了计算。如表8b所示,当高模量涂层具有1.6GPa的模量以及低模量内涂层的厚度是约6至约18微米时,可以实现小于0.1dB/km的MAP。当高模量涂层具有1.6GPa的模量以及低模量内涂层的厚度是约10至约14微米时,可以实现小于0.06dB/km的MAP。当高模量涂层具有2.0GPa的模量以及低模量内涂层的厚度是约6至约18微米时,可以实现小于0.1dB/km的MAP。当高模量涂层具有2.0GPa的模量以及低模量内涂层的厚度是约10至约14微米时,可以实现小于0.05dB/km的MAP。

[0224] 表8a:具有凹陷辅助分布以及包层直径为100微米且E<sub>p</sub>=0.5MPa的光纤的MAP

[0225]

玻璃半径 R <sub>g</sub> (微米)	低模量内涂 层厚度 t <sub>p</sub> (微米)	低模量内涂 层半径 R <sub>p</sub> (微米)	高模量涂 层半径 R <sub>s</sub> (微米)	高模量涂 层厚度 t <sub>s</sub> (微米)	Es=1.2 GPa 的 MAP (dB/km)	Es=1.6 GPa 的 MAP (dB/km)	Es=2.0 GPa 的 MAP (dB/km)
50	5	55	82.5	27.5	0.261	0.196	0.157
50	6	56	82.5	26.5	0.191	0.144	0.115
50	7	57	82.5	25.5	0.148	0.111	0.089
50	8	58	82.5	24.5	0.120	0.090	0.072
50	9	59	82.5	23.5	0.101	0.076	0.061
50	10	60	82.5	22.5	0.087	0.066	0.052
50	11	61	82.5	21.5	0.077	0.058	0.046
50	12	62	82.5	20.5	0.069	0.052	0.042
50	13	63	82.5	19.5	0.064	0.048	0.038
50	14	64	82.5	18.5	0.059	0.045	0.036
50	15	65	82.5	17.5	0.056	0.042	0.034
50	16	66	82.5	16.5	0.054	0.041	0.033
50	17	67	82.5	15.5	0.053	0.040	0.032
50	18	68	82.5	14.5	0.052	0.039	0.031
50	19	69	82.5	13.5	0.052	0.039	0.032
50	20	70	82.5	12.5	0.052	0.040	0.032
50	21	71	82.5	11.5	0.054	0.041	0.033
50	22	72	82.5	10.5	0.056	0.043	0.034
50	23	73	82.5	9.5	0.059	0.045	0.037
50	24	74	82.5	8.5	0.063	0.049	0.040
50	25	75	82.5	7.5	0.069	0.053	0.044
50	26	76	82.5	6.5	0.075	0.059	0.049
50	27	77	82.5	5.5	0.084	0.067	0.056
50	28	78	82.5	4.5	0.094	0.076	0.064
50	29	79	82.5	3.5	0.108	0.089	0.076
50	30	80	82.5	2.5	0.128	0.106	0.092

[0226]

50	31	81	82.5	1.5	0.166	0.139	0.121
----	----	----	------	-----	-------	-------	-------

[0227]

表8b:具有凹陷辅助分布以及包层直径为125微米且Ep=0.5MPa的光纤的MAP

[0228]

玻璃半径 R <sub>g</sub> (微米)	低模量内涂 层厚度 t <sub>p</sub> (微米)	低模量内涂 层半径 R <sub>p</sub> (微米)	高模量涂 层半径 R <sub>s</sub> (微米)	高模量涂 层厚度 t <sub>s</sub> (微米)	Es=1.2 GPa 的 MAP (dB/km)	Es=1.6 GPa 的 MAP (dB/km)	Es=2.0 GPa 的 MAP (dB/km)
62.5	5	67.5	82.5	15	0.167	0.126	0.101
62.5	6	68.5	82.5	14	0.129	0.097	0.078
62.5	7	69.5	82.5	13	0.106	0.080	0.064
62.5	8	70.5	82.5	12	0.091	0.069	0.056
62.5	9	71.5	82.5	11	0.082	0.062	0.050
62.5	10	72.5	82.5	10	0.076	0.058	0.047
62.5	11	73.5	82.5	9	0.073	0.056	0.045
62.5	12	74.5	82.5	8	0.072	0.055	0.045
62.5	13	75.5	82.5	7	0.072	0.056	0.046
62.5	14	76.5	82.5	6	0.075	0.059	0.049
62.5	15	77.5	82.5	5	0.078	0.063	0.053
62.5	16	78.5	82.5	4	0.084	0.068	0.058
62.5	17	79.5	82.5	3	0.092	0.076	0.065
63.5	18	81.5	83.5	2	0.108	0.090	0.078
64.5	19	83.5	84.5	1	0.149	0.125	0.108

[0229] 图21显示光纤的抗穿刺性与低模量内涂层厚度的关系,所述光纤具有:凹陷辅助分布(例如,如上表2所示),100微米的包层直径,模量为0.5MPa的低模量涂层,以及模量为1.2、1.6和2.0GPa的高模量涂层。如图21和表9a所示,当高模量涂层具有1.6GPa的模量以及低模量内涂层的厚度小于约14微米时,可以实现大于30g的抗穿刺性。当高模量涂层具有1.6GPa的模量以及低模量内涂层的厚度小于约8微米时,可以实现大于35g的抗穿刺性。当高模量涂层具有2.0GPa的模量以及低模量内涂层的厚度小于约18微米时,可以实现大于30g的抗穿刺性。当高模量涂层具有2.0GPa的模量以及低模量内涂层的厚度小于约14微米时,可以实现大于35g的抗穿刺性。当高模量涂层具有2.0GPa的模量以及低模量内涂层的厚度小于约9微米时,可以实现大于40g的抗穿刺性。还对具有凹陷辅助分布、125微米包层直径、模量为0.5MPa的低模量内涂层以及模量为1.2、1.6和2.0GPa的高模量涂层的光纤进行了计算。如表9b所示,当高模量涂层具有1.6GPa的模量以及低模量内涂层的厚度小于约12微米时,可以实现大于20g的抗穿刺性。当高模量涂层具有1.6GPa的模量以及低模量内涂层的厚度小于约7微米时,可以实现大于25g的抗穿刺性。当高模量涂层具有2.0GPa的模量以及低模量内涂层的厚度小于约13微米时,可以实现大于20g的抗穿刺性。当高模量涂层具有2.0GPa的模量以及低模量内涂层的厚度小于约9微米时,可以实现大于25g的抗穿刺性。当高模量涂层具有2.0GPa的模量以及低模量内涂层的厚度小于或等于约6微米时,可以实现大于30g的抗穿刺性。

[0230] 表9a:具有凹陷辅助分布以及包层直径为100微米且 $E_p=0.5\text{MPa}$ 的光纤的抗穿刺性

[0231]

玻璃半径 R <sub>g</sub> (微米)	低模量内涂 层厚度 t <sub>p</sub> (微米)	低模量内涂 层半径 R <sub>p</sub> (微米)	高模量涂 层半径 R <sub>s</sub> (微米)	高模量涂 层厚度 t <sub>s</sub> (微米)	Es=1.2 GPa 的抗穿刺 性 (g)	Es=1.6 GPa 的抗穿刺 性 (g)	Es=2.0 GPa 的抗穿刺 性 (g)
50	5	55	82.5	27.5	31.2	37.9	44.5
50	6	56	82.5	26.5	30.6	37.1	43.5
50	7	57	82.5	25.5	30.0	36.3	42.5
50	8	58	82.5	24.5	29.4	35.5	41.5
50	9	59	82.5	23.5	28.8	34.7	40.5
50	10	60	82.5	22.5	28.2	33.8	39.5
50	11	61	82.5	21.5	27.5	33.0	38.4
50	12	62	82.5	20.5	26.9	32.1	37.3
50	13	63	82.5	19.5	26.2	31.2	36.2
50	14	64	82.5	18.5	25.6	30.3	35.1

[0232]

50	15	65	82.5	17.5	24.9	29.4	34.0
50	16	66	82.5	16.5	24.2	28.5	32.8
50	17	67	82.5	15.5	23.5	27.6	31.6
50	18	68	82.5	14.5	22.8	26.6	30.5
50	19	69	82.5	13.5	22.0	25.6	29.2
50	20	70	82.5	12.5	21.3	24.7	28.0
50	21	71	82.5	11.5	20.6	23.7	26.8
50	22	72	82.5	10.5	19.8	22.7	25.5
50	23	73	82.5	9.5	19.1	21.7	24.2
50	24	74	82.5	8.5	18.3	20.6	23.0
50	25	75	82.5	7.5	17.5	19.6	21.6
50	26	76	82.5	6.5	16.7	18.5	20.3
50	27	77	82.5	5.5	15.9	17.4	19.0
50	28	78	82.5	4.5	15.1	16.3	17.6
50	29	79	82.5	3.5	14.2	15.2	16.2
50	30	80	82.5	2.5	13.4	14.1	14.8
50	31	81	82.5	1.5	12.5	13.0	13.4

[0233]

表9b: 具有凹陷辅助分布以及包层直径为100微米且 $E_p=0.5\text{MPa}$ 的光纤的抗穿刺性

	玻璃半径 R <sub>g</sub> (微米)	低模量内涂 层厚度 t <sub>p</sub> (微米)	低模量内涂 层半径 R <sub>p</sub> (微米)	高模量涂 层半径 R <sub>s</sub> (微米)	高模量涂 层厚度 t <sub>s</sub> (微米)	Es=1.2 GPa 的抗穿刺性 (g)	Es=1.6 GPa 的抗穿刺性 (g)	Es=2.0 GPa 的抗穿刺性 (g)
[0234]	62.5	5	67.5	82.5	15	23.1	27.1	31.0
	62.5	6	68.5	82.5	14	22.4	26.1	29.9
	62.5	7	69.5	82.5	13	21.7	25.2	28.6
	62.5	8	70.5	82.5	12	20.9	24.2	27.4
	62.5	9	71.5	82.5	11	20.2	23.2	26.2
	62.5	10	72.5	82.5	10	19.4	22.2	24.9
[0235]	62.5	11	73.5	82.5	9	18.7	21.1	23.6
	62.5	12	74.5	82.5	8	17.9	20.1	22.3
	62.5	13	75.5	82.5	7	17.1	19.0	21.0
	62.5	14	76.5	82.5	6	16.3	18.0	19.6
	62.5	15	77.5	82.5	5	15.5	16.9	18.3
	62.5	16	78.5	82.5	4	14.7	15.8	16.9
	62.5	17	79.5	82.5	3	13.8	14.7	15.5
	63.5	18	81.5	83.5	2	13.0	13.5	14.1
	64.5	19	83.5	84.5	1	12.1	12.4	12.7

[0236] 图22显示光纤的MAP与低模量内涂层厚度的关系,所述光纤具有:凹陷辅助光纤分布(例如,如上表2所示),100微米的包层直径,模量为1.6GPa的高模量涂层,以及模量为0.5、0.35和0.2MPa的低模量内涂层。如图22和表10a所示,当低模量内涂层具有0.35MPa的模量以及低模量内涂层的厚度是约8至约29微米时,可以实现小于0.05dB/km的MAP。当低模量内涂层具有0.35MPa的模量以及低模量内涂层的厚度是约16至约21微米时,可以实现小于0.02dB/km的MAP。当低模量内涂层具有0.2MPa的模量以及低模量内涂层的厚度是约4至约31微米时,可以实现小于0.05dB/km的MAP。当低模量内涂层具有0.2MPa的模量以及低模量内涂层的厚度是约7至约29微米时,可以实现小于0.02dB/km的MAP。当低模量内涂层具有0.2MPa的模量以及低模量内涂层的厚度是约11至约25微米时,可以实现小于0.01dB/km的MAP。当低模量内涂层具有0.2MPa的模量以及低模量内涂层的厚度是约16至约21微米时,可以实现小于0.007dB/km的MAP。还对具有凹陷辅助光纤分布、125微米包层直径、模量为1.6GPa的高模量涂层以及模量为0.5、0.35和0.2MPa的低模量内涂层的光纤进行了计算。如表10b所示,当低模量内涂层具有0.35MPa的模量以及低模量内涂层的厚度是约6至约18微米时,可以实现小于0.05dB/km的MAP。当低模量内涂层具有0.35MPa的模量以及低模量内涂层的厚度是约10至约14微米时,可以实现小于0.03dB/km的MAP。当低模量内涂层具有0.2MPa的模量以及低模量内涂层的厚度是约4至约19微米时,可以实现小于0.03dB/km的MAP。当低模量内涂层具有0.2MPa的模量以及低模量内涂层的厚度是约6至约17微米时,可以实现小于0.02dB/km的MAP。当低模量内涂层具有0.2MPa的模量以及低模量内涂层的厚度是约10至约13微米时,可以实现小于0.01dB/km的MAP。

[0237] 表10a:具有凹陷辅助分布以及包层直径为100微米且 $E_s=1.6\text{GPa}$ 的光纤的MAP

玻璃半径 $R_g$ (微米)	低模量内涂 层厚度 $t_p$ (微米)	低模量内涂 层半径 $R_p$ (微米)	高模量涂 层半径 $R_s$ (微米)	高模量涂 层厚度 $t_s$ (微米)	$E_p=0.5\text{MPa}$ 的 MAP (dB/km)	$E_p=0.35\text{MPa}$ 的 MAP (dB/km)	$E_p=0.2\text{MPa}$ 的 MAP (dB/km)
50	5	55	82.5	27.5	0.196	0.096	0.031
50	6	56	82.5	26.5	0.144	0.070	0.023
50	7	57	82.5	25.5	0.111	0.055	0.018
50	8	58	82.5	24.5	0.090	0.044	0.015
50	9	59	82.5	23.5	0.076	0.037	0.012
50	10	60	82.5	22.5	0.066	0.032	0.011
50	11	61	82.5	21.5	0.058	0.028	0.009
50	12	62	82.5	20.5	0.052	0.026	0.008
50	13	63	82.5	19.5	0.048	0.024	0.008
50	14	64	82.5	18.5	0.045	0.022	0.007
50	15	65	82.5	17.5	0.042	0.021	0.007
50	16	66	82.5	16.5	0.041	0.020	0.007
50	17	67	82.5	15.5	0.040	0.020	0.006
50	18	68	82.5	14.5	0.039	0.019	0.006
50	19	69	82.5	13.5	0.039	0.019	0.006
50	20	70	82.5	12.5	0.040	0.020	0.006
50	21	71	82.5	11.5	0.041	0.020	0.007
50	22	72	82.5	10.5	0.043	0.021	0.007
50	23	73	82.5	9.5	0.045	0.023	0.008
50	24	74	82.5	8.5	0.049	0.024	0.008
50	25	75	82.5	7.5	0.053	0.027	0.009
50	26	76	82.5	6.5	0.059	0.030	0.010
50	27	77	82.5	5.5	0.067	0.035	0.012
50	28	78	82.5	4.5	0.076	0.041	0.015
50	29	79	82.5	3.5	0.089	0.048	0.018
50	30	80	82.5	2.5	0.106	0.059	0.023
50	31	81	82.5	1.5	0.139	0.078	0.031

[0240] 表10b:具有凹陷辅助分布以及包层直径为125微米且 $E_s=1.6\text{GPa}$ 的光纤的MAP

[0241]

玻璃半 径 R <sub>g</sub> (微米)	低模量内涂 层厚度 t <sub>p</sub> (微米)	低模量内涂 层半径 R <sub>p</sub> (微米)	高模量涂 层半径 R <sub>s</sub> (微米)	高模量涂 层厚度 t <sub>s</sub> (微米)	E <sub>p</sub> =0.5 MPa 的 MAP (dB/km)	E <sub>p</sub> =0.35 MPa 的 MAP (dB/km)	E <sub>p</sub> =0.2 MPa 的 MAP (dB/km)
62.5	5	67.5	82.5	15	0.126	0.062	0.020
62.5	6	68.5	82.5	14	0.097	0.048	0.016
62.5	7	69.5	82.5	13	0.080	0.040	0.013
62.5	8	70.5	82.5	12	0.069	0.034	0.011
62.5	9	71.5	82.5	11	0.062	0.031	0.010
62.5	10	72.5	82.5	10	0.058	0.029	0.010
62.5	11	73.5	82.5	9	0.056	0.028	0.009
62.5	12	74.5	82.5	8	0.055	0.028	0.009
62.5	13	75.5	82.5	7	0.056	0.029	0.010
62.5	14	76.5	82.5	6	0.059	0.030	0.011
62.5	15	77.5	82.5	5	0.063	0.033	0.012
62.5	16	78.5	82.5	4	0.068	0.037	0.014
62.5	17	79.5	82.5	3	0.076	0.042	0.016
63.5	18	81.5	83.5	2	0.090	0.050	0.020
64.5	19	83.5	84.5	1	0.125	0.070	0.028

[0242] 表11a显示光纤的MAP与低模量内涂层厚度的关系,所述光纤具有:凹陷辅助光纤分布(例如,如上表2所示),100微米的包层直径,模量为2.0GPa的高模量涂层,以及模量为0.35、0.2和0.1MPa的低模量内涂层。如表11a所示,当低模量内涂层具有0.35MPa的模量以及低模量内涂层的厚度是约6至约30微米时,可以实现小于0.02dB/km的MAP。当低模量内涂层具有0.35MPa的模量以及低模量内涂层的厚度是约13至约23微米时,可以实现小于0.02dB/km的MAP。当低模量内涂层具有0.2MPa的模量以及低模量内涂层的厚度是约6至约30微米时,可以实现小于0.02dB/km的MAP。当低模量内涂层具有0.2MPa的模量以及低模量内涂层的厚度是约9至约27微米时,可以实现小于0.01dB/km的MAP。当低模量内涂层具有0.2MPa的模量以及低模量内涂层的厚度是约14至约22微米时,可以实现小于0.005dB/km的MAP。当低模量内涂层具有0.1MPa的模量以及低模量内涂层的厚度是约6至约29微米时,可以实现小于0.005dB/km的MAP。当低模量内涂层具有0.1MPa的模量以及低模量内涂层的厚度是约13至约23微米时,可以实现小于0.002dB/km的MAP。还对具有凹陷辅助光纤分布、125微米包层直径、模量为2.0GPa的高模量涂层以及模量为0.35、0.2和0.1MPa的低模量内涂层的光纤进行了计算。如表10b所示,当低模量内涂层具有0.35MPa的模量以及低模量内涂层的厚度是约5至约12微米时,可以实现小于0.03dB/km的MAP。当低模量内涂层具有0.2MPa的模量以及低模量内涂层的厚度是约5至约18微米时,可以实现小于0.02dB/km的MAP。当低模量内涂层具有0.2MPa的模量以及低模量内涂层的厚度是约8至约14微米时,可以实现小于0.01dB/km的MAP。当低模量内涂层具有0.1MPa的模量以及低模量内涂层的厚度是约5至约18微米时,可以实现小于0.005dB/km的MAP。当低模量内涂层具有0.1MPa的模量以及低模量

内涂层的厚度是约8至约14微米时,可以实现小于0.01dB/km的MAP。表11a:具有凹陷辅助分布以及包层直径为100微米且 $E_s=2.0\text{GPa}$ 的光纤的MAP

[0243]	玻璃半 径 $R_g$ (微米)	低模量内涂 层厚度 $t_p$ (微米)	低模量内涂 层半径 $R_p$ (微米)	高模量涂 层半径 $R_s$ (微米)	高模量涂 层厚度 $t_s$ (微米)	$E_p=0.35\text{ MPa}$ 的 MAP (dB/km)	$E_p=0.2\text{ MPa}$ 的 MAP (dB/km)	$E_p=0.1\text{ MPa}$ 的 MAP (dB/km)
	50	5	55	82.5	27.5	0.077	0.025	0.006
	50	6	56	82.5	26.5	0.056	0.018	0.005
	50	7	57	82.5	25.5	0.044	0.014	0.004
	50	8	58	82.5	24.5	0.036	0.012	0.003
	50	9	59	82.5	23.5	0.030	0.010	0.002
	50	10	60	82.5	22.5	0.026	0.008	0.002
	50	11	61	82.5	21.5	0.023	0.007	0.002
	50	12	62	82.5	20.5	0.021	0.007	0.002
	50	13	63	82.5	19.5	0.019	0.006	0.002
	50	14	64	82.5	18.5	0.018	0.006	0.001
	50	15	65	82.5	17.5	0.017	0.005	0.001
	50	16	66	82.5	16.5	0.016	0.005	0.001
	50	17	67	82.5	15.5	0.016	0.005	0.001
[0244]	50	18	68	82.5	14.5	0.015	0.005	0.001
	50	19	69	82.5	13.5	0.016	0.005	0.001
	50	20	70	82.5	12.5	0.016	0.005	0.001
	50	21	71	82.5	11.5	0.016	0.005	0.001
	50	22	72	82.5	10.5	0.017	0.006	0.001
	50	23	73	82.5	9.5	0.018	0.006	0.002
	50	24	74	82.5	8.5	0.020	0.007	0.002
	50	25	75	82.5	7.5	0.022	0.007	0.002
	50	26	76	82.5	6.5	0.025	0.008	0.002
	50	27	77	82.5	5.5	0.029	0.010	0.003
	50	28	78	82.5	4.5	0.034	0.012	0.003
	50	29	79	82.5	3.5	0.041	0.015	0.004
	50	30	80	82.5	2.5	0.051	0.020	0.006
	50	31	81	82.5	1.5	0.067	0.027	0.009

[0245] 表11b:具有凹陷辅助分布以及包层直径为125微米且 $E_s=2.0\text{GPa}$ 的光纤的MAP

[0246]

玻璃半径 R <sub>g</sub> (微米)	低模量内涂层厚度 t <sub>p</sub> (微米)	低模量内涂层半径 R <sub>p</sub> (微米)	高模量涂层半径 R <sub>s</sub> (微米)	高模量涂层厚度 t <sub>s</sub> (微米)	Ep=0.35 MPa 的 MAP (dB/km)	Ep=0.2 MPa 的 MAP (dB/km)	Ep=0.1 MPa 的 MAP (dB/km)
62.5	5	67.5	82.5	15	0.050	0.016	0.004
62.5	6	68.5	82.5	14	0.039	0.013	0.003
62.5	7	69.5	82.5	13	0.032	0.010	0.003
62.5	8	70.5	82.5	12	0.028	0.009	0.002
62.5	9	71.5	82.5	11	0.025	0.008	0.002
62.5	10	72.5	82.5	10	0.023	0.008	0.002
62.5	11	73.5	82.5	9	0.023	0.008	0.002
62.5	12	74.5	82.5	8	0.023	0.008	0.002
62.5	13	75.5	82.5	7	0.024	0.008	0.002
62.5	14	76.5	82.5	6	0.025	0.009	0.002
62.5	15	77.5	82.5	5	0.028	0.010	0.003
62.5	16	78.5	82.5	4	0.031	0.011	0.003
62.5	17	79.5	82.5	3	0.036	0.014	0.004
63.5	18	81.5	83.5	2	0.043	0.017	0.005
64.5	19	83.5	84.5	1	0.061	0.024	0.008

[0247] 可以合并图19-23以及表7-11中给出的计算得到的MAP和抗穿刺性的结果来提供得到最大MAP和最小抗穿刺性的低模量内涂层和高模量涂层的最小厚度,来输入低模量初级涂层的最大模量(E<sub>p</sub>)、高模量涂层的最小模量(E<sub>s</sub>)、玻璃半径(R<sub>g</sub>)和高模量涂层半径(R<sub>s</sub>)的数值。表12a总结了包层直径为100微米且E<sub>s</sub>=1.6GPa的实施例1-4的涂层性质。表12b和12c总结了包层直径为100微米且E<sub>s</sub>=2.0GPa的实施例5-14的涂层性质。表12d和12e总结了包层直径为100微米的实施例15-21的涂层性质。

[0248] 表12a:提供给定数值的最大MAP和最小抗穿刺性的低模量内涂层和高模量涂层的最小厚度

		实施例 1	实施例 2	实施例 3	实施例 4
[0249]	玻璃半径 R <sub>g</sub> (微米)	50	50	50	50
	最大 E <sub>p</sub> (MPa)	0.5	0.35	0.2	0.2
	最小 E <sub>s</sub> (GPa)	1.6	1.6	1.6	1.6
	凹陷辅助分布的最大 MAP (dB/km)	0.05	0.03	0.03	0.01
	最小抗穿刺性 (g)	30	30	30	30
	低模量内涂层的最小厚度 t <sub>p</sub> (微米)	13	11	7	11
	低模量内涂层的最大厚度 t <sub>p</sub> (微米)	14	14	14	14
	高模量涂层的最小厚度 t <sub>s</sub> (微米)	18.5	18.5	18.5	18.5
	高模量涂层的最大厚度 t <sub>s</sub> (微米)	19.5	21.5	25.5	21.5
	高模量涂层的最小半径 R <sub>s</sub> (微米)	64	64	64	64
	次级涂层的最小横截面面积 (平方微米)	17029	17029	17029	17029

[0250] 表12b:提供给定数值的最大MAP和最小抗穿刺性的低模量内涂层和高模量涂层的最小厚度

		实施例 5	实施例 6	实施例 7	实施例 8	实施例 9
[0251]	玻璃半径 R <sub>g</sub> (微米)	50	50	50	50	50
	最大 E <sub>p</sub> (MPa)	0.5	0.35	0.5	0.35	0.2
	最小 E <sub>s</sub> (GPa)	2	2	2	2	2
	凹陷辅助分布的最大 MAP (dB/km)	0.05	0.02	0.05	0.02	0.02
	最小抗穿刺性 (g)	30	30	35	35	35
	低模量内涂层的最小厚度 t <sub>p</sub> (微米)	11	13	11	13	6
	低模量内涂层的最大厚度 t <sub>p</sub> (微米)	18	18	14	14	14
	高模量涂层的最小厚度 t <sub>s</sub> (微米)	14.5	14.5	18.5	18.5	18.5
[0252]	高模量涂层的最大厚度 t <sub>s</sub> (微米)	21.5	19.5	21.5	19.5	26.5
	高模量涂层的最小半径 R <sub>s</sub> (微米)	68	68	64	64	64
	次级涂层的最小横截面面积 (平方微米)	13711	13711	17029	17029	17029

[0253] 表12c:提供给定数值的最大MAP和最小抗穿刺性的低模量内涂层和高模量涂层的最小厚度

		实施例 10	实施例 11	实施例 12	实施例 13	实施例 14
[0254]	玻璃半径 R <sub>g</sub> (微米)	50	50	50	50	50
	最大 E <sub>p</sub> (MPa)	0.2	0.2	0.1	0.2	0.1
	最小 E <sub>s</sub> (GPa)	2	2	2	2	2
	凹陷辅助分布的最大 MAP (dB/km)	0.01	0.007	0.003	0.01	0.007
	最小抗穿刺性 (g)	35	35	35	40	40
	低模量内涂层的最小厚度 t <sub>p</sub> (微米)	9	11	9	9	5
	低模量内涂层的最大厚度 t <sub>p</sub> (微米)	14	14	14	9.5	9.5
	高模量涂层的最小厚度 t <sub>s</sub> (微米)	18.5	18.5	18.5	23	23
	高模量涂层的最大厚度 t <sub>s</sub> (微米)	23.5	21.5	23.5	23.5	27.5
	高模量涂层的最小半径 R <sub>s</sub> (微米)	64	64	64	59.5	59.5
次级涂层的最小横截面面积 (平方微米)		17029	17029	17029	20521	20521

[0255] 表12d:提供给定数值的最大MAP和最小抗穿刺性的低模量内涂层和高模量涂层的最小厚度

		实施例 15	实施例 17	实施例 18	实施例 19
[0256]	玻璃半径 R <sub>g</sub> (微米)	62.5	62.5	62.5	62.5
	最大 E <sub>p</sub> (MPa)	0.35	0.35	0.35	0.2
	最小 E <sub>s</sub> (GPa)	1.6	1.6	2	2
[0257]	凹陷辅助分布的最大 MAP (dB/km)	0.05	0.03	0.03	0.01
	最小抗穿刺性 (g)	20	20	25	25
	低模量内涂层的最小厚度 t <sub>p</sub> (微米)	6	10	8	7
	低模量内涂层的最大厚度 t <sub>p</sub> (微米)	12	12	10	10
	高模量涂层的最小厚度 t <sub>s</sub> (微米)	8	8	10	10
	高模量涂层的最大厚度 t <sub>s</sub> (微米)	14	10	12	13
	高模量涂层的最小半径 R <sub>s</sub> (微米)	74.5	74.5	72.5	72.5
	次级涂层的最小横截面面积 (平方微米)		7892	7892	9739

[0258] 表12e:提供给定数值的最大MAP和最小抗穿刺性的低模量内涂层和高模量涂层的最小厚度

	实施例 20	实施例 21	实施例 22
玻璃半径 R <sub>g</sub> (微米)	62.5	62.5	62.5
最大 E <sub>p</sub> (MPa)	0.1	0.1	0.1
最小 E <sub>s</sub> (GPa)	2	2	2
凹陷辅助分布的最大 MAP (dB/km)	0.007	0.003	0.007
最小抗穿刺性 (g)	25	25	30
[0259] 低模量内涂层的最小厚度 t <sub>p</sub> (微米)	5	7	5
低模量内涂层的最大厚度 t <sub>p</sub> (微米)	10	10	6
高模量涂层的最小厚度 t <sub>s</sub> (微米)	10	10	14
高模量涂层的最大厚度 t <sub>s</sub> (微米)	15	13	15
高模量涂层的最小半径 R <sub>s</sub> (微米)	72.5	72.5	68.5
次级涂层的最小横截面面积 (平方微米)	9739	9739	13283

[0260] 直径减小的示例性实施方式

[0261] 如上文所讨论的那样,本文公开实施方式的光纤可以具有约125微米的玻璃直径,以及减小的涂层直径可以具有如下外直径:约175微米或更小,或者约170微米或更小,或者约165微米或更小,或者约160微米或更小,或者约145微米或更小。要注意的是,包层区域50的外直径是光纤46的玻璃直径,以及高模量涂层58的外直径可以是光纤46的整体外直径(当没有施涂颜料外涂料层的情况下)。

[0262] 在一些示例性例子中,包层区域50具有约125微米的外直径以及高模量涂层58具有约155至175微米的外直径,或者包层区域50具有约125微米的外直径以及高模量涂层58具有约160至170微米的外直径。

[0263] 如上文所讨论的那样,本文公开实施方式的光纤还可以具有约100微米的玻璃直径,以及减小的涂层直径可以具有如下外直径:约175微米或更小,或者约170微米或更小,或者约165微米或更小,或者约160微米或更小,或者约145微米或更小。要注意的是,包层区域50的外直径是光纤46的玻璃直径,以及高模量涂层58的外直径可以是光纤46的整体外直径(当没有施涂颜料外涂料层的情况下)。

[0264] 在一些示例性例子中,包层区域50具有约100微米的外直径以及高模量涂层58具有约155至175微米的外直径,或者包层区域50具有约100微米的外直径以及高模量涂层58具有约160至170微米的外直径。

[0265] 如上文所讨论的那样,本公开内容的直径减小的光纤分布设计提供了特定的优势,例如海底光缆和中继器中更高的光纤数。然而,由于包层的轮廓减小,光纤的包层直径减小可能允许一些光通过包层发生泄漏。因此,本公开内容的偏移凹陷设计具有约30% Δ -

微米<sup>2</sup>或大的凹陷体积从而有利地降低了由于透过直径减小的包层的光泄漏所导致的“隧道”或“辐射”损失。

[0266] 为了有助于光纤直径的减小,优选使得低模量内涂层的厚度 $r_5-r_4$ 最小化,或者完全消除低模量内涂层。低模量内涂层的厚度 $r_5-r_4$ 是:小于或等于约8.0微米,或者小于或等于约7.0微米,或者小于或等于约6.0微米,或者小于或等于约5.0微米,或者约4.0微米至约8.0微米的范围内,或者约5.0微米至约7.0微米的范围内。然而,消除或者降低光纤的低模量内涂层的厚度会增加微弯曲敏感性。在本文公开的设计中,通过添加体积大于约30%  $\Delta$ -微米<sup>2</sup>的偏移凹陷来缓解这种敏感性增加。

[0267] 高模量涂层的半径 $r_6$ 是:小于或等于约87.5微米,或者小于或等于约85.0微米,或者小于或等于约82.5微米,或者小于或等于约80.0微米。还优选对高模量涂层的厚度 $r_6-r_5$ 进行优化以平衡光纤直径的下降和具有足够高的横截面面积以具有高的抗穿刺性。高模量涂层的厚度 $r_6-r_5$ 是:小于或等于约25.0微米,或者小于或等于约20.0微米,或者小于或等于约15.0微米,或者约15.0微米至约25.0微米的范围,或者约17.5微米至22.5微米的范围,或者约18.0微米至22.0微米的范围。低模量涂层与高模量涂层的总厚度约为25微米或更小,优选约为20微米或更小。在一些实施方式中,低模量涂层与高模量涂层的总厚度是约10微米至约25微米。在一些实施方式中,低模量涂料层涂层的厚度与高模量涂料层的厚度之比范围是0.8至1.2。

[0268] 因而,根据本公开内容实施方式的光纤相比于传统光纤具有减小的涂层直径。尺寸减小帮助增加了例如海底中继器或光缆中的“光纤数”以及光纤密度。

[0269] 下表10提供了五种高模量涂层样品的平均涂层厚度。实施例1和2与实施例3、4和5进行对比,显示8.0微米至20.0微米范围内的平均高模量涂层厚度产生了相比低于这个范围的平均厚度而言更高的拉伸强度。实施例1和2所展现出的更高的拉伸强度实现了光纤(例如,海底光缆和中继器中所用的那些)使用更薄的高模量涂层。

[0270] 表10:高模量涂层的厚度

实施例编号	1	2	3	4	5
[0271] 平均高模量涂层厚度	10.2 微米	10.7 微米	6.7 微米	6.7 微米	6.0 微米
拉伸强度 (100 kpsi 筛查率)	89%	93%	4%	26%	24%

[0272] 示例性的低模量与高模量涂层

[0273] 下文对示例性的低模量和高模量的涂层以及涂层的强度和抗穿刺性的测量进行了讨论。

[0274] 低模量涂层:组成。低模量涂层组合物包含下表11给出的配方,并且是典型的市售可得低模量涂层组合物。

[0275] 表11:参考低模量涂料组合物

组分	量
低聚物材料	50.0重量%
SR504	46.5重量%
NVC	2.0重量%

TPO	1.5重量%
Irganox 1035	1.0pph
3-丙烯酰氧基丙基三甲氧基硅烷	0.8pph
季戊四醇四-(3-巯基丙酸酯)	0.032pph

[0277] 其中,如本文所述从H12MDI、HEA和PPG4000采用摩尔比 $n:m:p=3.5:3.0:2.0$ 来制备低聚物材料;SR504是乙氧基化(4)壬基酚丙烯酸酯(购自沙多玛公司(Sartomer));NVC是N-乙烯基己内酰胺(购自奥德里奇公司(Aldrich));TPO(光引发剂)是(2,4,6-三甲基苯甲酰)-二苯基氧化膦(购自巴斯夫公司);Irganox 1035(抗氧化剂)是苯丙酸,3,5-二(1,1-二甲基乙基)-4-羟基硫代二-2,1-乙烷二基酯(购自巴斯夫公司);3-丙烯酰氧基丙基三甲氧基硅烷是粘合促进剂(购自格勒斯特公司(Gelest));以及季戊四醇四-(3-巯基丙酸酯)(也被称作四硫醇,购自奥德里奇公司)是链转移剂。浓度单位“pph”指的是相对于包含所有单体、低聚物和光引发剂的基础组合物的量。例如,1.0pph浓度的Irganox 1035对应于每100g的低聚物材料、SR504、NVC和TPO的总量,具有1g的Irganox 1035。

[0278] 通过在室温下的500mL烧瓶中混合H12MDI(4,4'-亚甲基双(环己基异氰酸酯))、二月桂基二丁基锡和2,6-二叔丁基-4-甲基酚来制备低聚物材料。该500mL烧瓶配有热电偶、CaCl<sub>2</sub>干燥管和搅拌器。在对烧瓶内含物进行持续搅拌的同时,使用加料漏斗在30-40分钟的时间段上加入PPG4000。在添加PPG4000时,监测反应混合物的内部温度,并且对PPG4000的引入进行控制,以防止(由于反应的放热特性而产生的)过度加热。在添加了PPG4000之后,在约70°C至75°C的油浴中,加热反应混合物持续约1至1.5小时。在各种时间间隔,取样反应混合物样品,通过红外光谱(FTIR)分析,通过确定未反应的异氰酸酯基团的浓度来监测反应进程。基于接近2265cm<sup>-1</sup>的特征异氰酸酯拉伸模式的强度,来评估未反应的异氰酸酯基团的浓度。从油浴取出烧瓶,并使得内含物自然冷却至低于65°C。进行加入补充HEA,以确保异氰酸酯基团的完全猝灭。使用加料漏斗,在2-5分钟的时间段上,逐滴加入补充的HEA。在添加了补充的HEA之后,烧瓶返回至油浴,并且其内含物再次加热到约70°C至75°C,持续约1至1.5小时。对反应混合物进行FTIR分析,以评估是否存在异氰酸酯基团,并且重复该过程直到添加了足够的补充HEA与任意未反应的异氰酸酯基团发生完全反应。当在FTIR测量中没有检测到可察觉的异氰酸酯拉伸强度时,视作完全反应。

[0279] 高模量涂层:组成。表12中列出了四种可固化的高模量涂层组合物(A、SB、SC和SD)。

[0280] 表12:高模量涂料组合物

组分	组成			
	A	SB	SC	SD
PE210 (重量%)	15.0	15.0	15.0	15.0
M240 (重量%)	72.0	72.0	72.0	62.0
M2300 (重量%)	10.0	-	-	-
[0281] M3130 (重量%)	-	10.0	-	-
M370 (重量%)	-	-	10.0	20.0
TPO (重量%)	1.5	1.5	1.5	1.5
Irgacure 184 (重量%)	1.5	1.5	1.5	1.5
Irganox 1035 (pph)	0.5	0.5	0.5	0.5
DC-190 (pph)	1.0	1.0	1.0	1.0

[0282] PE210是双酚A环氧二丙烯酸酯(购自韩国Miwon特种化学品公司);M240是乙氧基化(4)双酚A二丙烯酸酯(购自韩国Miwon特种化学品公司);M2300是乙氧基化(30)双酚A二丙烯酸酯(购自韩国Miwon特种化学品公司);M3130是乙氧基化(3)三羟甲基丙烷三丙烯酸酯(购自韩国Miwon特种化学品公司);TPO(光引发剂)是(2,4,6-三甲基苯甲酰基)二苯基氧化膦(购自巴斯夫公司);Irgacure 184(光引发剂)是1-羟基环己基苯基酮(购自巴斯夫公司);Irganox 1035(抗氧化剂)是苯丙酸,3,5-二(1,1-二甲基乙基)-4-羟基硫代二-2,1-乙烷二基酯(购自巴斯夫公司)。DC190(顺滑剂)是硅酮-环氧乙烷/环氧丙烷共聚物(购自陶氏化学品公司)。浓度单位“pph”指的是相对于包含所有单体和光引发剂的基础组合物的量。例如,对于高模量涂层组合物A,1.0pph浓度的DC-190对应于每100g的PE210、M240、M2300、TPO和Irgacure184的总量,具有1g的DC-190。

[0283] 高模量涂层:拉伸性质。采用上文所述技术来测量由高模量组合物A、SB、SC和SD制得的高模量涂层的杨氏模量、屈服拉伸强度、屈服强度和屈服伸长。结果总结在表13中。

[0284] 表13:高模量涂层的拉伸性质

性质	高模量组合物			
	A	SB	SC	SD
杨氏模量 (MPa)	2049.08	2531.89	2652.51	2775.94
[0285] 拉伸强度 (MPa)	86.09	75.56	82.02	86.08
屈服强度 (MPa)	48.21	61.23	66.37	70.05
屈服伸长 (%)	4.60	4.53	4.76	4.87
断裂韧度 $K_{Ic}$ (MPa·m <sup>1/2</sup> )	0.8580	0.8801	0.9471	0.9016

[0286] 结果显示由组合物SB、SC和SD制备得到的高模量涂层展现出比由比较例组合物A

制备得到的高模量涂层更高的杨氏模量和更高的屈服强度。此外,从组合物SB、SC和SD制备的高模量涂层展现出相比于从组合物A制备的高模量涂层更高的断裂韧度。组合物SB、SC和SD所展现出的更高数值实现了在没有牺牲性能的情况下光纤使用更薄的高模量涂层。如上文所讨论的那样,更薄的高模量涂层降低了光纤的整体直径并且在给定横截面面积的光缆中(例如,海底中继器中)提供了更高的光纤数。

[0287] 示例性光纤实施方式

[0288] 本文公开的实验实例和原理表明可以通过调节光纤的折射率分布和涂层性质从而直径减小的光纤中实现足够低的衰减和抗穿刺性性质。更具体来说,尽管具有较小的横截面面积,但是高模量涂层为直径减小的光纤提供了足够的抗穿刺性。

[0289] 图8是穿刺负荷(单位为克)与高模量涂层的横截面面积的依赖性关系图。虚线具有 $0.00263\text{g}/\mu\text{m}^2$ 的斜率且对应于具有约1500GPa的原位模量的高模量涂层的比较例光纤。实线是具有约1850GPa的原位模量的高模量涂层的五种光纤的测量数据的线性拟合。斜率为 $0.00328\text{g}/\mu\text{m}^2$ ,这近似等于参考光纤的斜率乘以原位模量之比(1850/1500)。点划线代表的是穿刺负荷(单位为克)与具有2200GPa原位模量的高模量涂层的横截面面积的建模依赖性关系。结果表明,高模量涂层的原位模量增加实现了横截面面积和厚度的降低,而没有使得较小直径光纤的抗穿刺性发生明显劣化。

[0290] 光纤拉制工艺

[0291] 可以由连续光纤制造工艺形成本文公开的光纤,在其过程中,从经加热的预制件拉制玻璃纤维并尺寸调节至目标直径。在包含低模量内涂层的光纤中,然后使得玻璃纤维冷却并引导到向玻璃纤维施涂液体低模量涂层组合物的涂覆系统。在向玻璃纤维施涂了液体低模量涂层组合物之后,存在两种可行的加工选项。在一个加工选项中(干碰湿工艺),液体低模量涂层组合物固化以形成凝固的低模量涂层,液体高模量涂层组合物施涂到固化的低模量涂层,以及液体高模量涂层组合物固化以形成凝固的高模量涂层。在第二种加工选项中(湿碰湿工艺),液体高模量涂层组合物施涂到液体低模量涂层组合物,并且这两种液体涂层组合物同时固化以提供凝固的低模量和高模量涂层。在光纤离开涂覆系统之后,对光纤进行收集并室温储存。光纤的收集通常需要将光纤卷绕到卷轴上并储存卷轴。

[0292] 在一些工艺中,涂覆系统还向高模量涂层施涂颜料外涂层组合物,并且使得颜料外涂层组合物固化以形成凝固的颜料外涂层。通常来说,颜料外涂层是出于鉴别目的对光纤进行标记的墨层,并且具有包含颜料以及其他方面来说与高模量涂层类似的组成。颜料外涂层施涂到高模量涂层并固化。通常来说,在施涂颜料外涂层的时候,高模量涂层已经固化了。可以在共用的连续制造工艺中施涂并固化低模量、高模量和颜料外涂层组合物。或者,可以在共用的连续制造工艺中施涂并固化低模量和高模量涂层组合物,对经过涂覆的光纤进行收集,以及在分开的离线式工艺中施涂并固化颜料外涂层组合物以形成颜料外涂层。

[0293] 涂覆应用、涂料材料粘度和涂覆模头尺寸

[0294] 在一些实施方式中,在拉制炉内从预制件拉制得到光纤,通过涂覆系统,在那里,向光纤施涂聚合物涂层。涂覆系统可以包括入口和尺寸调节模头。涂覆室布置在入口与尺寸调节模头之间。涂覆室填充液体形式的聚合物涂料材料。光纤通过入口进入涂覆系统并穿过涂覆室,在那里,将聚合物涂料材料施涂到光纤的表面。然后,光纤通过尺寸调节模头,

在那里,去除了当光纤离开涂覆系统时的任何过量的涂料材料,从而实现根据本文所述一些实施方式的具有规定直径的经涂覆的光纤。

[0295] 图12显示在给定的恒定拉制速度下(在这里的情况下是60m/分钟),涂料材料粘度和模头尺寸对于涂层厚度的影响。如图12所示,涂层厚度主要受到尺寸调节模头的直径的影响,而涂料材料粘度仅具有边际效用影响。例如,当尺寸调节模头从5.1密耳(129.54 $\mu\text{m}$ )变化到8.0密耳(203.2 $\mu\text{m}$ )时,经涂覆的光纤直径从127 $\mu\text{m}$ 变化到169 $\mu\text{m}$ ,而在给定的某模头尺寸下,涂层厚度随着宽范围的涂料材料粘度仅略微变化。在一些实施方式中,涂料材料的粘度在50rpm和25 $^{\circ}\text{C}$ 时大于20泊,或者在50rpm和25 $^{\circ}\text{C}$ 时大于40泊。

[0296] 图13显示在125微米玻璃光纤上形成 $132\pm 1\mu\text{m}$ 的目标最终涂覆直径的示例性参数窗口。如图13所示,尺寸调节模头鉴定为5.35密耳(135.89 $\mu\text{m}$ )至5.51密耳(140 $\mu\text{m}$ )的范围内,而涂料材料粘度可以在参数窗口中具有宽范围。因而,虽然涂料材料粘度对于最终涂层厚度仅具有边际效用影响,但是对于不同模头尺寸系统,有效大小是不同的。图14显示对于不同模头尺寸系统,源自各种涂料材料粘度的涂层厚度标准偏差。图14显示标准偏差随着模头尺寸的增加略微增加,并且当模头尺寸大于7密耳时急剧升高。图15显示根据本公开内容一些实施方式的拉制速度对于涂层厚度的影响。如图15所见,光纤的拉制速度对于涂层厚度影响有限。

[0297] 对于涂层同心度,假定涂覆模头中的润滑压力起到了居中作用力,以确保光纤在涂料施涂机中的居中。更高的润滑压力代表了更大的居中作用力,这会产生更好的涂层同心度。图16显示的图绘制了对于一系列的涂料材料粘度,润滑压力与模头尺寸之间的相关性图。图16显示,润滑压力随着模头尺寸的增加而减小,并且随着涂料材料粘度的增加而增加。此外,图17显示润滑压力与拉制速度之间的相关性。如图17所示,随着拉制速度的增加,润滑压力首先急剧增加然后以缓慢节奏增加。因此,结合上文所讨论的粘度对于涂层厚度的影响,在给定模头尺寸的情况下,增加拉制速度和采用具有更大粘度的材料可以改善涂层同心度而没有使得涂层厚度质量发生劣化。

[0298] 具有薄涂层的光纤的性能数据

[0299] 这些具有薄涂层的光纤的关键性能指标包括:它们的总外直径,聚合物涂层的厚度,50kpsi强度筛查下每单位长度的破裂数,以及50kpsi筛查之后的最长保存长度。将高模量涂料层施涂到125 $\mu\text{m}$ 单模光纤(SMF)光纤上,具有约7 $\mu\text{m}$ 的总体涂层厚度(参见表15的Reel ID 121-6599-3和Reel ID 122-6645-4)。筛查力越低,则未破裂的光纤段越长。高模量涂覆的光纤(Reel ID 121-6599-3)具有与新鲜高模量涂覆的光纤(Reel ID 122-6645-4)相似的光纤强度。发明人发现,采用新鲜高模量涂覆的光纤的薄丙烯酸酯硬光纤涂层具有大于约70%的同心度,并且在一些实施方式中,大于约80%,或者大于约85%,或者大于约90%,或者大于约95%。

[0300] 表15:具有高模量涂层的光纤的性能数据

	Reel ID	121-6599-3	121-6599-4	122-6645-3	122-6645-4
[0301]	拉制	SMF	SMF	SMF	SMF
	玻璃直径( $\mu\text{m}$ )	125	125	125	125
	拉制速度(m/分钟)	50	50	50	50
	总保存的光纤(m)	6000	6000	6000	6160
	总筛查的光纤(m)	5000	5000	5000	5000
	高模量涂层模头尺寸(密耳)	5.4	6	6	5.4
	高模量涂层直径( $\mu\text{m}$ )	132	140	140	132
光纤筛查	筛查重量(kpsi)	50	50	50	50
	破裂数	22	1	1	21
	最长保存长度(m)	694	4659	4646	396
	剥段数量	6	0	0	6
	筛查的米数/(破裂数+1)	217	2500	2500	227

[0302] 相比于施涂到125 $\mu\text{m}$  SMF光纤上的具有约7 $\mu\text{m}$ 总涂层厚度的老化的高模量薄丙烯酸酯涂料涂覆的光纤(参见表16的Reel ID 121-6602-10和Reel ID 121-6602-12), Reel ID 121-6599-3中所示的新鲜高模量涂覆的光纤同时显示出高得多的最长保存长度(m)和薄涂覆光纤筛查米数/(破裂数+1)之比的数据,当薄涂覆的光纤以50kpsi作用力筛查时。这三种光纤的破裂在整个光纤筛查长度上是相当均匀分布的。这表明老的高模量涂覆光纤最有可能发生劣化,特别是在储存期间。此外,所有这三种薄丙烯酸酯涂覆的光纤都具有良好的同心度(即,>70%)。

[0303] 表16:具有高模量涂层的光纤的性能数据

	Reel ID	121-6602-10	121-6602-12
[0304]	拉制运行数据		
	玻璃类型	SMF	SMF
	玻璃直径( $\mu\text{m}$ )	125	125
	拉制速度(m/分钟)	40	35
	总保存的光纤(m)	1200	1200
	总筛查的光纤(m)	1200	2950
	高模量涂层模头尺寸(密耳)	5.4	5.4
	高模量涂层直径( $\mu\text{m}$ )	132	132
光纤筛查	筛查重量(kpsi)	变化的	50
	破裂数	27	21
	最长保存长度(m)	132	189
	剥段数量	4	3
	筛查的米数/(破裂数+1)	43	134

[0305] 将新鲜高模量涂料层的薄丙烯酸酯涂料施涂到125 $\mu\text{m}$  SMF光纤上,具有15 $\mu\text{m}$ 的总体涂层厚度(参见表15的Reel ID 121-6599-4和Reel ID 122-6645-3)。通过采用新鲜高模量涂料层使得涂层厚度从Reel ID 121-6599-3中的7 $\mu\text{m}$ 增加到Reel ID 121-6599-4中的15 $\mu\text{m}$ ,薄涂覆的光纤要牢固得多,表现为最长保存长度(m)和薄涂覆光纤筛查米数/(破裂数+1)之比这两者的明显增加,当薄涂覆的光纤以50kpsi筛查时。通过采用新鲜高模量涂料层使得涂层厚度从Reel ID 122-6645-4中的7 $\mu\text{m}$ 增加到Reel ID 122-6645-3中的15 $\mu\text{m}$ ,薄涂覆的光纤要牢固得多,表现为最长保存长度(m)和薄涂覆光纤筛查米数/(破裂数+1)之比这两者的明显增加,当薄涂覆的光纤以50kpsi作用力筛查时。此外,薄的丙烯酸酯光纤硬涂层具有良好的同心度(即,>70%)。这些具有15 $\mu\text{m}$ 总涂层厚度的薄丙烯酸酯涂覆的光纤(表15中的Reel ID 121-6599-4和Reel ID 122-6645-3)足够牢固从而在带光缆过程中存活下来。

[0306] 还进行了新鲜低模量涂料层和新鲜高模量涂料层的薄的双层丙烯酸酯光纤涂覆(参见表16的Reel ID 121-6599-5)。低模量涂料层的厚度为9 $\mu\text{m}$ ,以及高模量涂料层的厚度为8 $\mu\text{m}$ 。低模量涂料层加上高模量涂料层的总厚度为17 $\mu\text{m}$ 。薄的丙烯酸酯涂层运行光滑,并且光纤上的涂层没有缺陷。这种薄涂覆的光纤以50kpsi筛查并且筛查结果与125 $\mu\text{m}$  SMF光

纤上的具有15 $\mu\text{m}$ 总涂层厚度的新鲜高模量涂料层相似(参见表15中的Reel ID 121-6599-4)。薄的丙烯酸酯光纤硬涂层具有良好的同心度(即,>70%)。这种薄的丙烯酸酯涂覆的光纤也足够牢固从而在带光缆过程中存活下来。在存在软的薄的低模量涂料层的情况下,这种双层薄涂覆光纤相比于一层薄硬涂层光纤改善了微弯曲性能。

[0307] 表17:具有低模量涂层和高模量涂层的光纤的性能数据

[0308]		Reel ID	121-6599-5
	拉制运行数据	玻璃类型	SMF
		玻璃直径( $\mu\text{m}$ )	125
		拉制速度(m/分钟)	50
[0309]		总保存的光纤(m)	6300
		总筛查的光纤(m)	5000
		低模量涂层模头尺寸(密耳)	5.4
		低模量涂层直径( $\mu\text{m}$ )	134
		高模量涂层模头尺寸(密耳)	6
		高模量涂层直径( $\mu\text{m}$ )	142
	光纤筛查	筛查重量(kpsi)	50
		破裂数	3
		最长保存长度(m)	4652
		剥段数量	0
		筛查的米数/(破裂数+1)	1250

[0310] 对于标准单模光纤(渐变折射率纤芯,具有二氧化硅内包层和正掺杂外包层,相对

折射率分布如图18所示),进行新鲜低模量涂料层和新鲜高模量涂料层的薄双层丙烯酸酯光纤涂层拉制。光纤涂层参数以及测得的光学参数如下表18所示。下表显示了具有145 $\mu\text{m}$ /175 $\mu\text{m}$ 、140 $\mu\text{m}$ /160 $\mu\text{m}$ 和0 $\mu\text{m}$ /140 $\mu\text{m}$ 的低模量涂层直径/高模量涂层直径的三种薄涂层构造。具有190 $\mu\text{m}$ /250 $\mu\text{m}$ 的低模量涂层直径/高模量涂层直径的光纤是用作对照的标准涂层。对于薄涂覆的光纤,测得的光缆截止波长、MFD类似于对照光纤,这表明薄涂层没有影响这些参数。对于具有145 $\mu\text{m}$ /175 $\mu\text{m}$ 和140 $\mu\text{m}$ /160 $\mu\text{m}$ 的低模量内涂层直径/高模量涂层直径的光纤,1310和1550nm处的衰减与对照光纤相同,这显示出这些薄涂层构造没有导致任何衰减惩罚。具有0 $\mu\text{m}$ /140 $\mu\text{m}$ 的低模量内涂层直径/高模量涂层直径的光纤的衰减略高于其他光纤,这是由于单涂料层导致的,但是对于采用短光纤的许多应用(例如,数据中心)是可接受的。

[0311] 表18:145 $\mu\text{m}$ /175 $\mu\text{m}$ 、140 $\mu\text{m}$ /160 $\mu\text{m}$ 和0 $\mu\text{m}$ /140 $\mu\text{m}$ 的低模量涂层和高模量涂层直径的光纤的性能数据

光纤 ID	涂层直径 低模量/高模量	光缆截止(nm)	1310 nm 处 MFD ( $\mu\text{m}$ )	1550 nm 处 MFD ( $\mu\text{m}$ )	1310 nm OTDR 衰减 (dB/km)	1550 nm OTDR 衰减 (dB/km)
142-1918-1001	145 $\mu\text{m}$ /175 $\mu\text{m}$	1223.7	9.1	10.3	0.333	0.188
142-1918-901	140 $\mu\text{m}$ /160 $\mu\text{m}$	1190.0	9.0	10.2	0.332	0.188
142-1918-1101	0 $\mu\text{m}$ /140 $\mu\text{m}$	1218.5	9.0	10.1	0.336	0.195
142-1918-801	190 $\mu\text{m}$ /250 $\mu\text{m}$	1208.8	9.1	10.4	0.333	0.188
142-1918-1201	190 $\mu\text{m}$ /250 $\mu\text{m}$	1221.0	9.1	10.2	0.333	0.188
142-1918-301	145 $\mu\text{m}$ /175 $\mu\text{m}$	1210.0	9.0	10.3	0.334	0.188
142-1918-201	140 $\mu\text{m}$ /160 $\mu\text{m}$	1220.0	9.1	10.2	0.333	0.188
142-1918-401	0 $\mu\text{m}$ /140 $\mu\text{m}$	1220.0	9.0	10.3	0.337	0.195
142-1918-101	190 $\mu\text{m}$ /250 $\mu\text{m}$	1180.0	9.1	10.2	0.333	0.188
142-1918-501	140 $\mu\text{m}$ /160 $\mu\text{m}$	1197.0	8.5	9.88	0.333	0.188
142-1918-601	145 $\mu\text{m}$ /175 $\mu\text{m}$	1189.9	9.0	10.2	0.333	0.188
142-1918-701	190 $\mu\text{m}$ /250 $\mu\text{m}$	1189.1	9.0	10.3	0.333	0.188

[0313] 对本领域的技术人员而言,显而易见的是可以在不偏离本发明的范围或精神的情况下进行各种修改和变动。因为本领域的技术人员可以想到所述实施方式的融合了本发明精神和实质的各种改良组合、子项组合和变化,应认为本发明包括所附权利要求书范围内的全部内容及其等同内容。

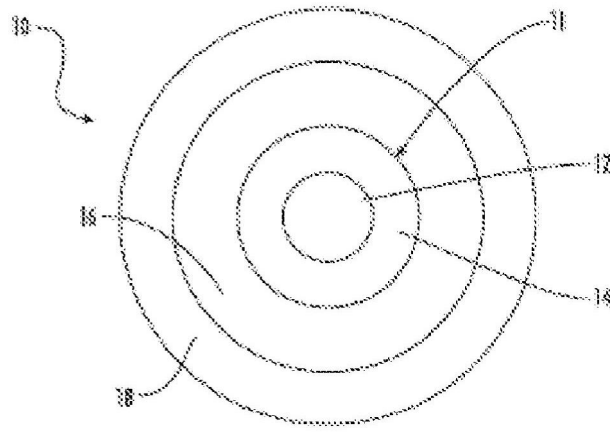


图1

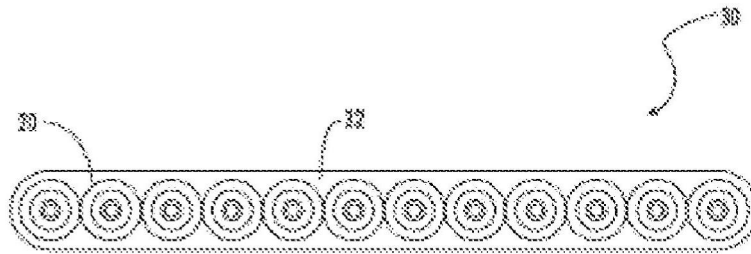


图2

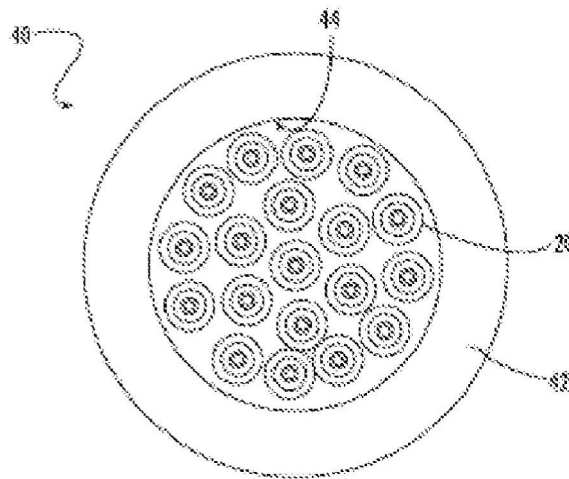


图3

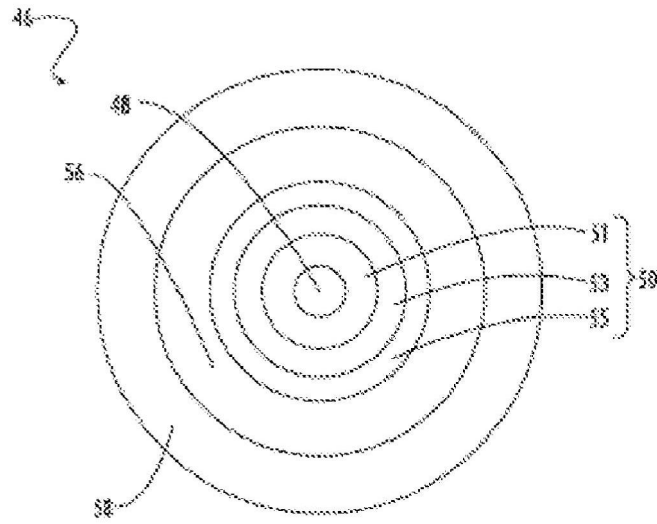


图4

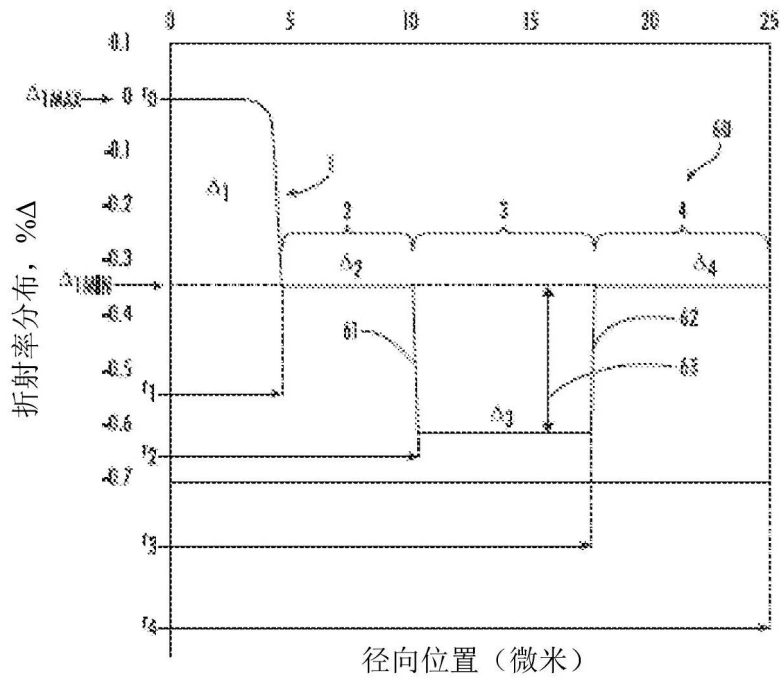


图5

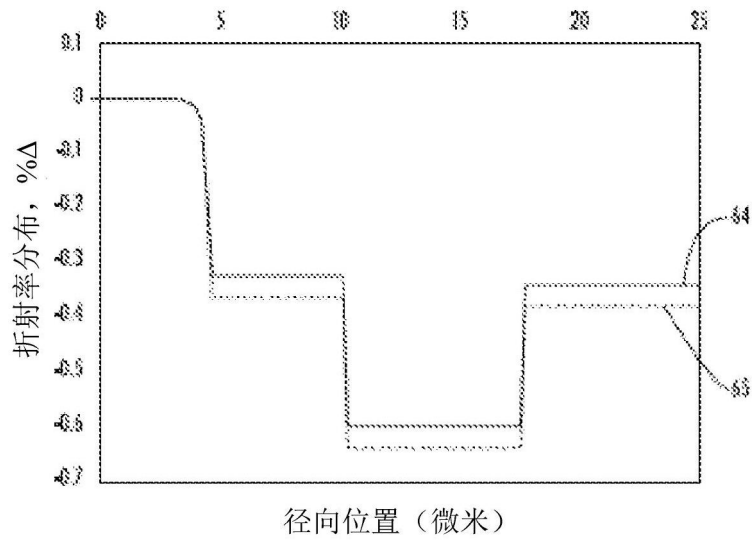


图6

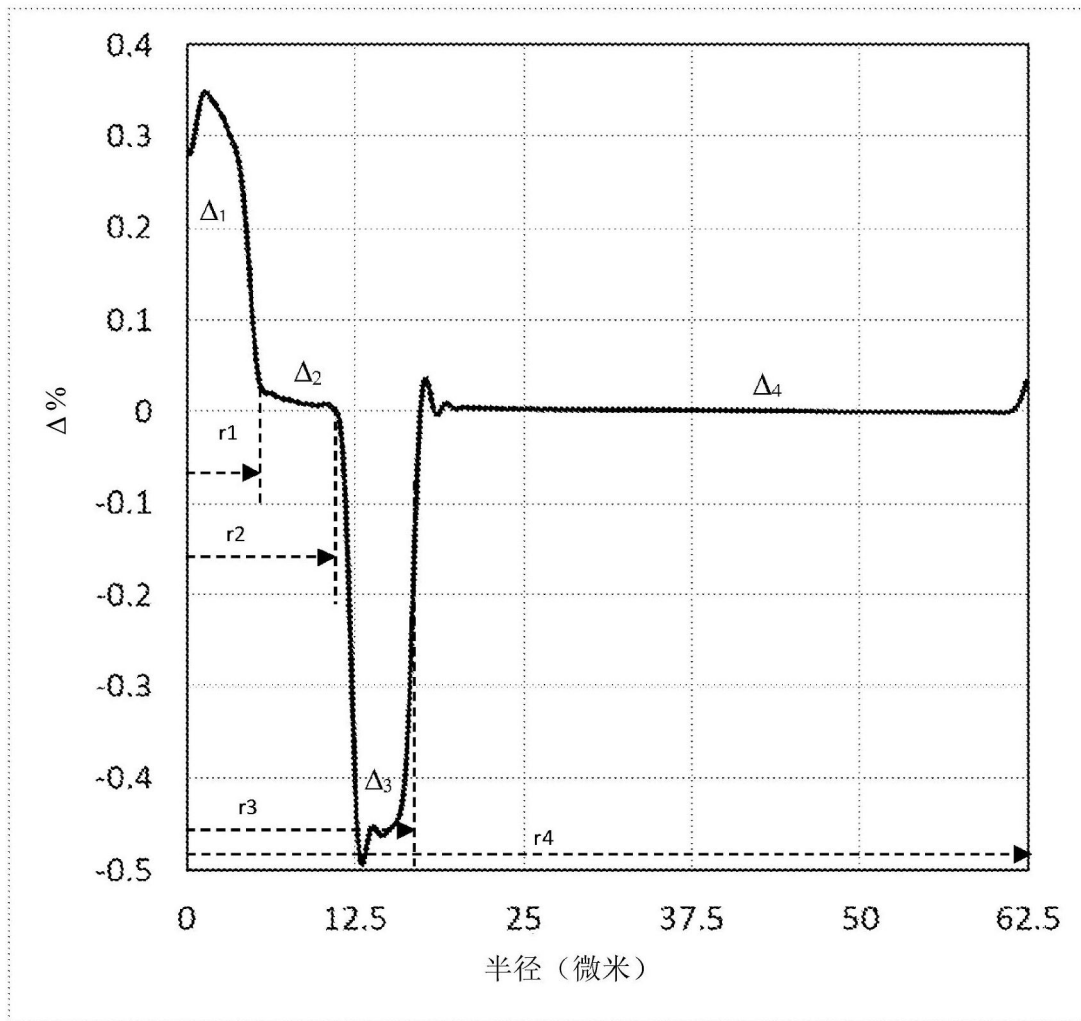


图7

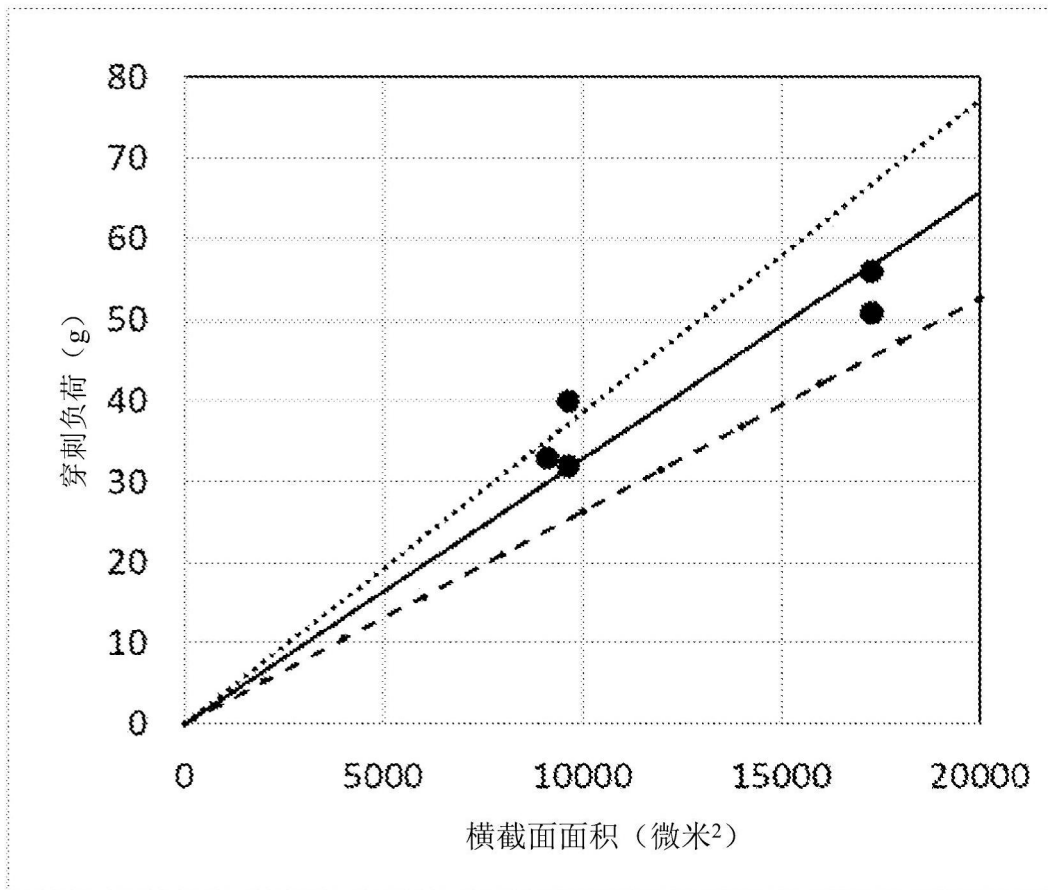


图8

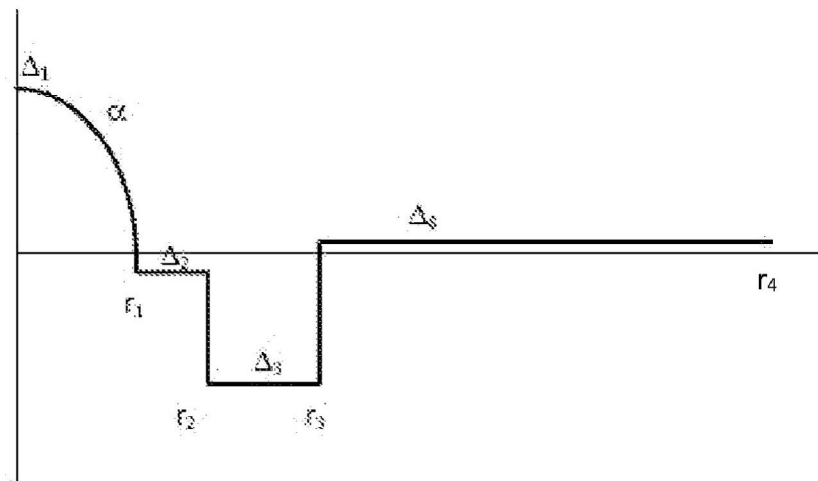


图9

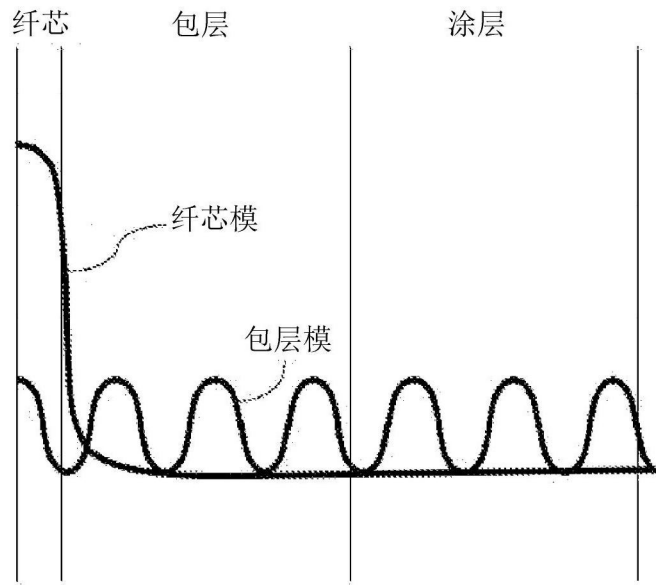


图10

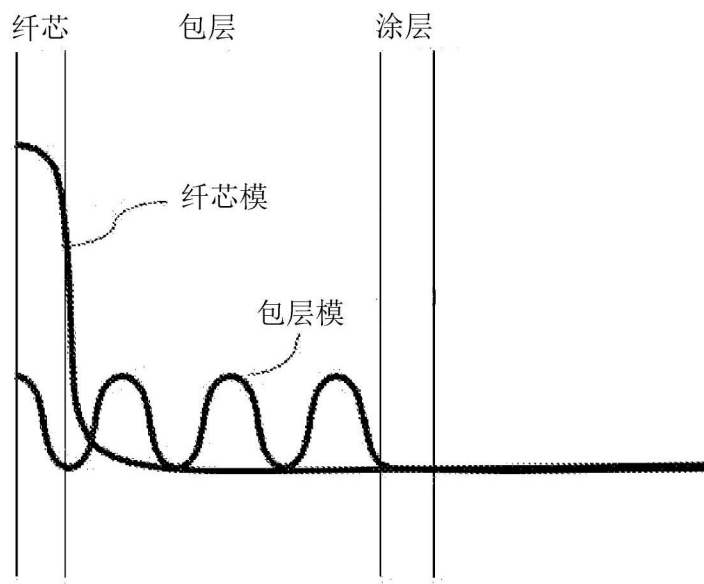


图11

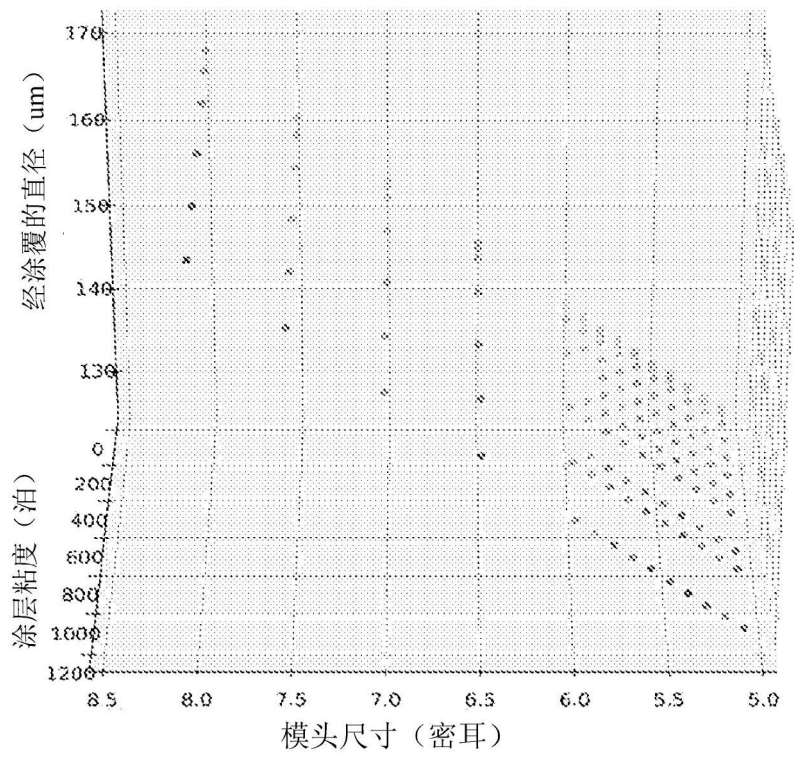


图12

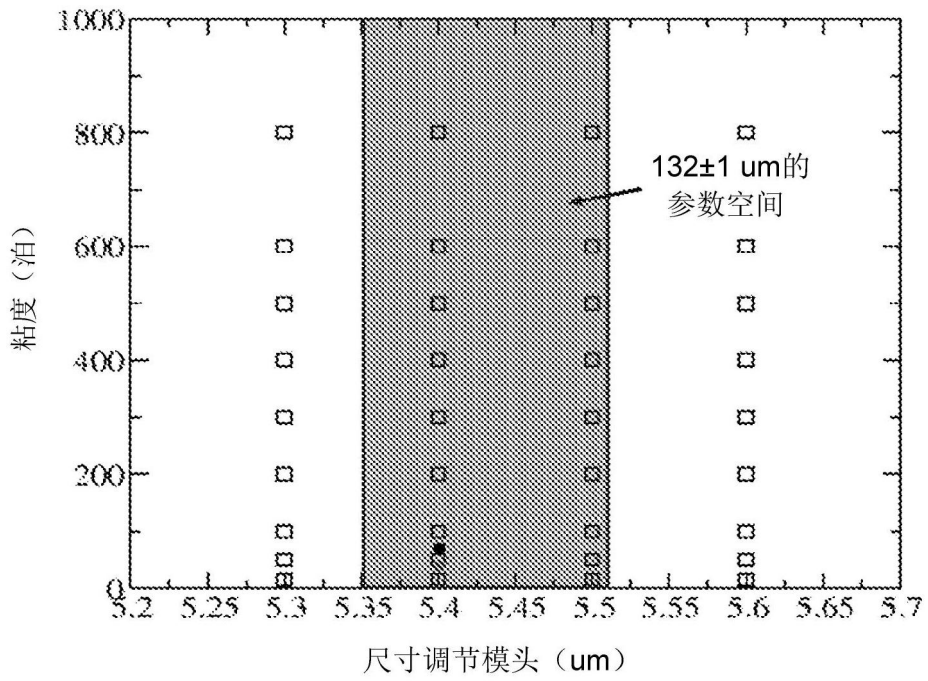


图13

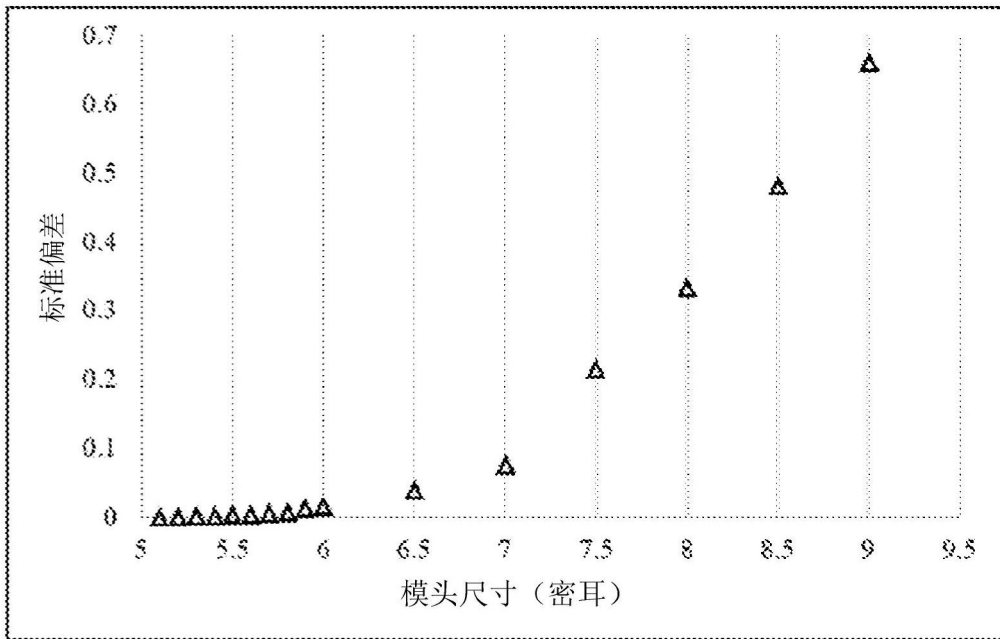


图14

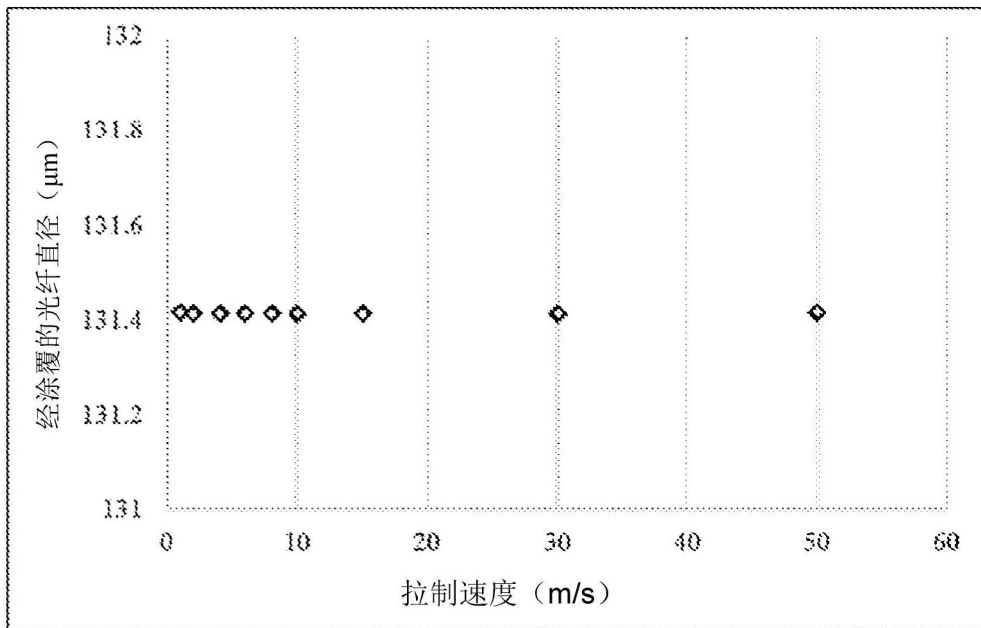


图15

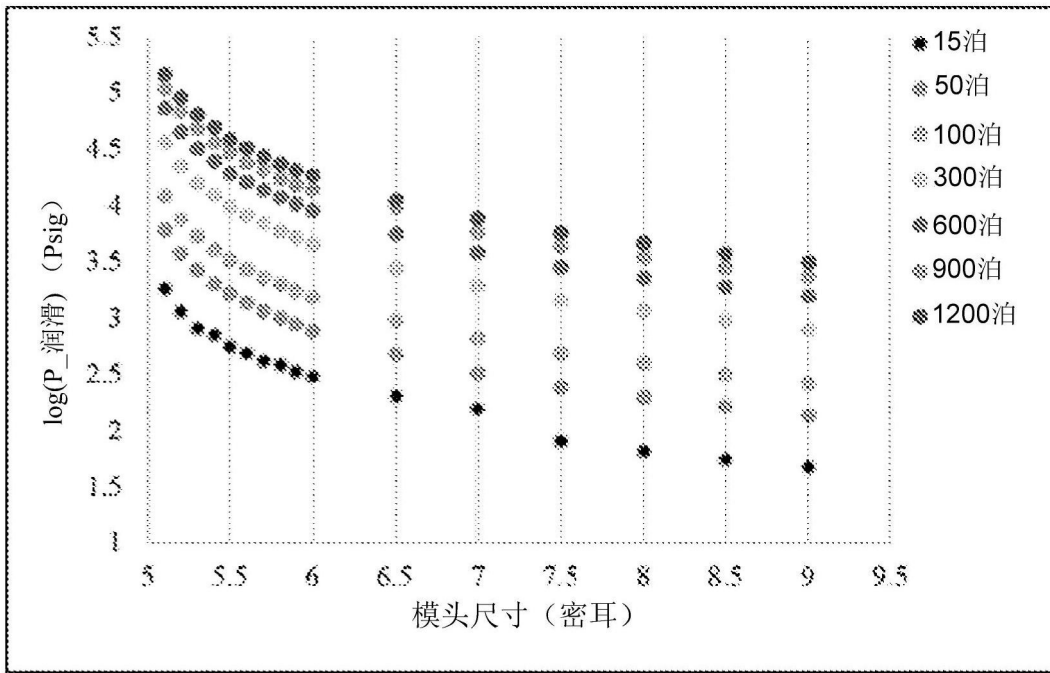


图16

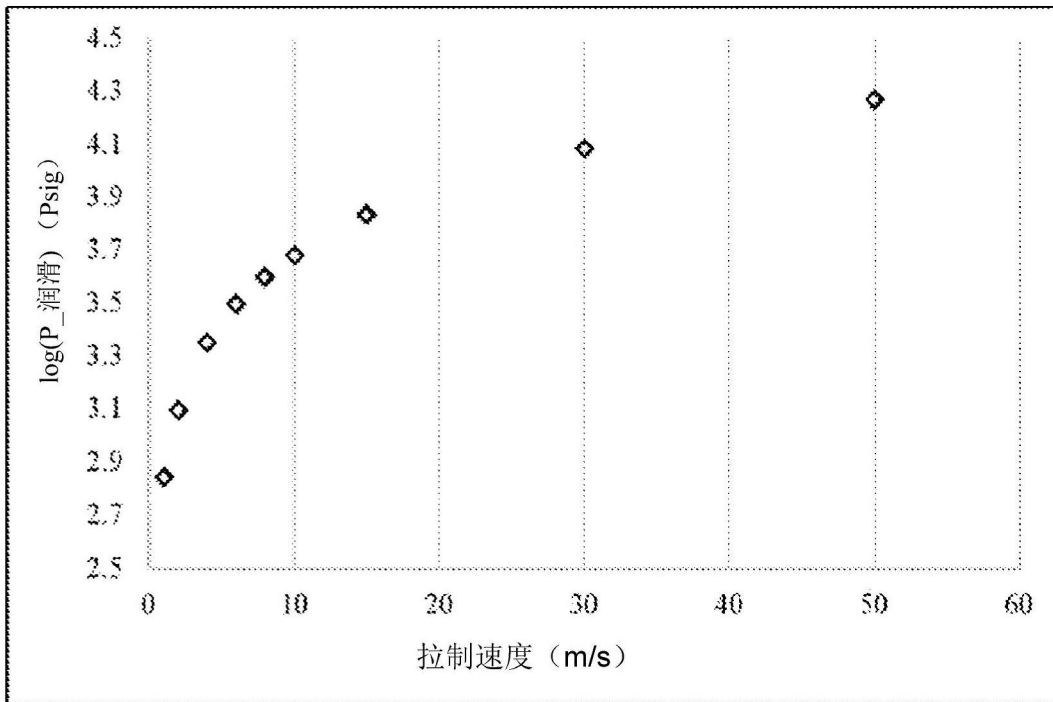


图17

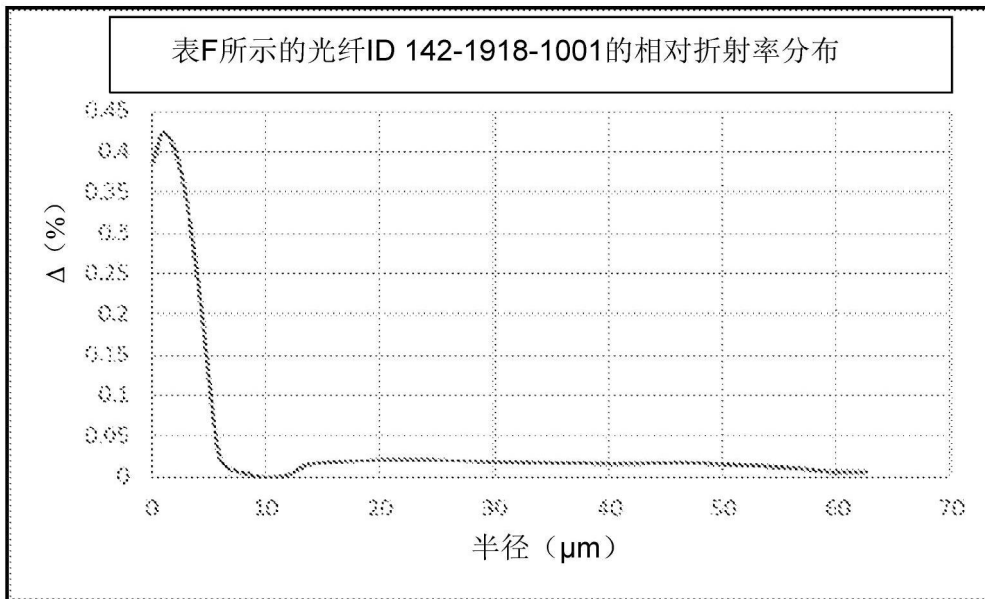


图18

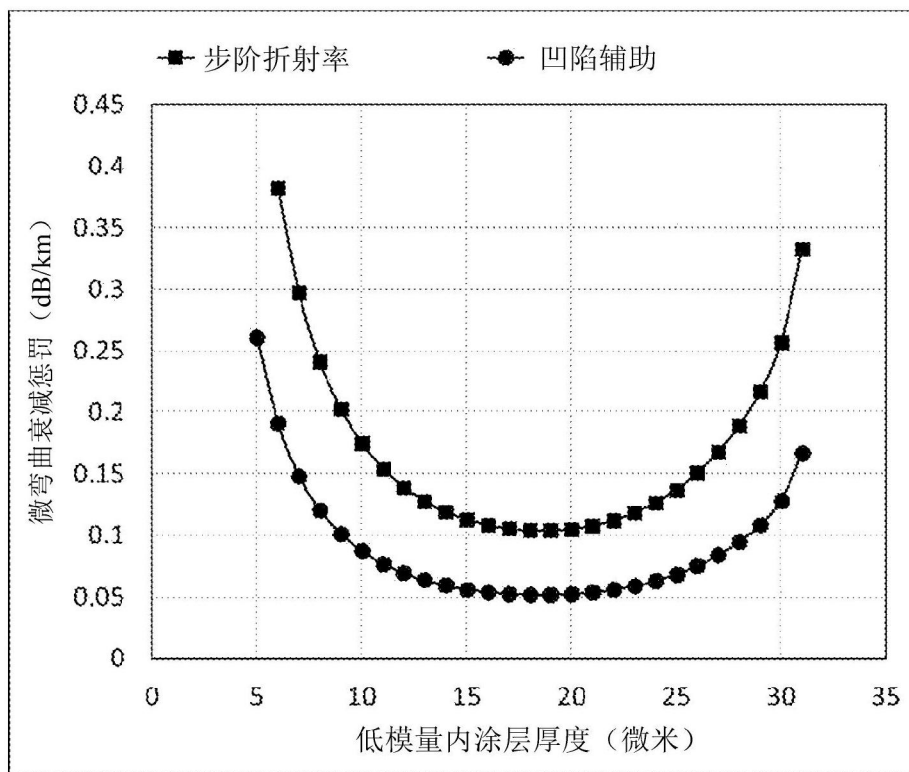


图19

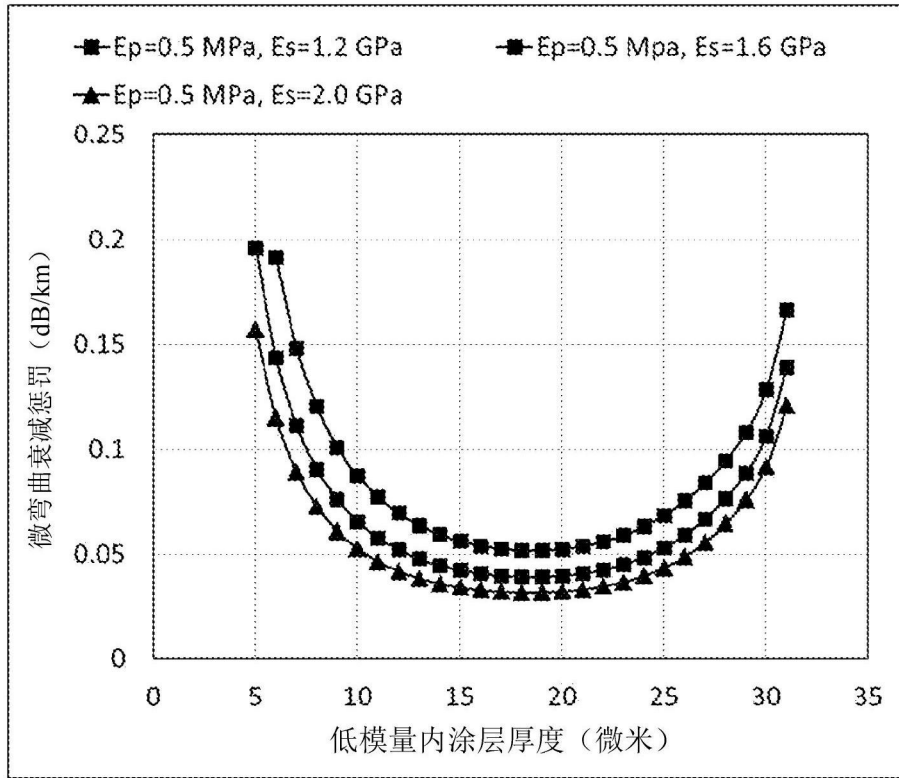


图20

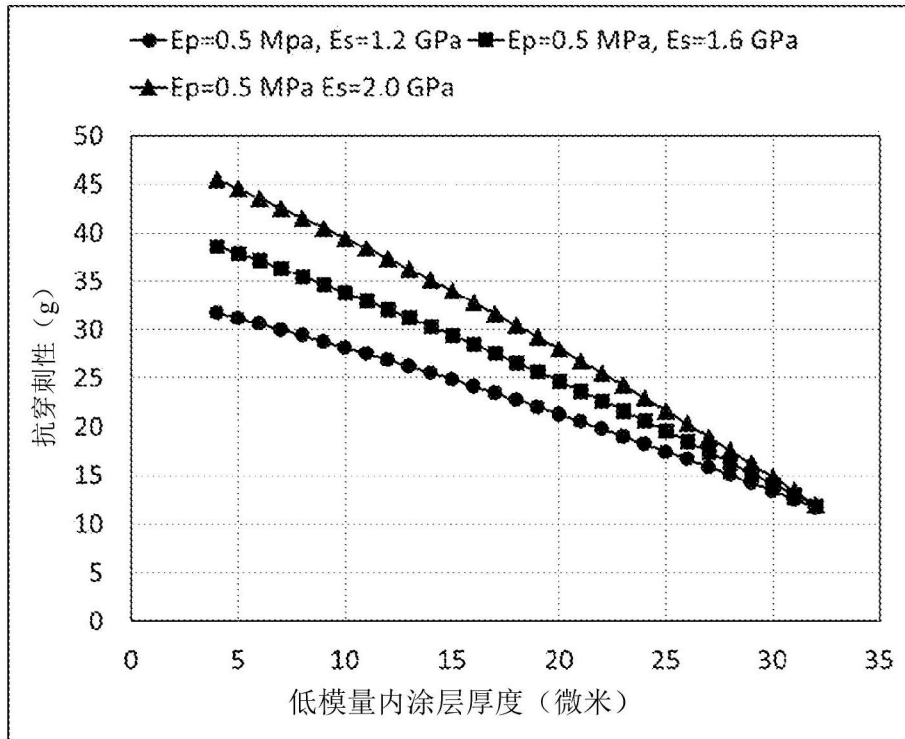


图21

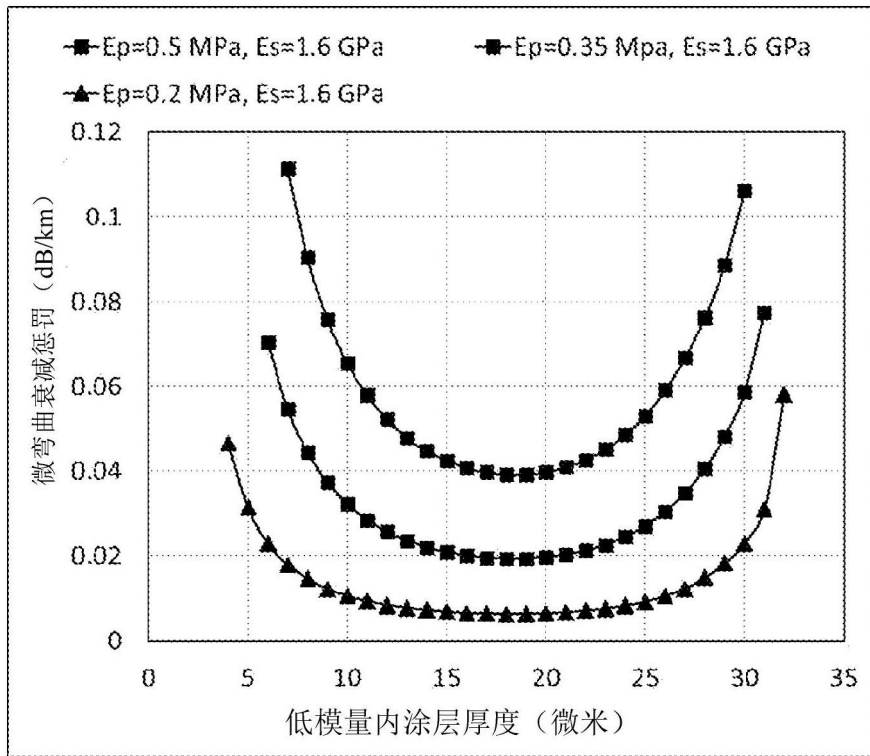


图22