



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 107710041 B

(45)授权公告日 2020.04.10

(21)申请号 201680032993.8

(22)申请日 2016.04.07

(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 107710041 A

(43)申请公布日 2018.02.16

(30)优先权数据
62/143,929 2015.04.07 US

(85)PCT国际申请进入国家阶段日
2017.12.06

(86)PCT国际申请的申请数据
PCT/US2016/026325 2016.04.07

(87)PCT国际申请的公布数据
W02016/164513 EN 2016.10.13

(73)专利权人 康宁股份有限公司
地址 美国纽约州

(72)发明人 D·C·布克宾德 M-J·李
P·坦登

(74)专利代理机构 上海专利商标事务所有限公
司 31100

代理人 徐鑫 项丹

(51)Int.Cl.
G02B 6/036(2006.01)
G02B 6/02(2006.01)
C03C 3/06(2006.01)
C03B 37/027(2006.01)

(56)对比文件
CN 101634728 A,2010.01.27,
US 2008285929 A1,2008.11.20,
US 2013136406 A1,2013.05.30,
US 2014241684 A1,2014.08.28,
CN 103380389 A,2013.10.30,
CN 101598834 A,2009.12.09,
CN 102770380 A,2012.11.07,
CN 1514262 A,2004.07.21,
CN 1826546 A,2006.08.30,

审查员 陈敏

权利要求书3页 说明书25页 附图6页

(54)发明名称

具有应力消除层的低衰减光纤、其预成形件及其制造方法

(57)摘要

一种单模光纤,其具有由二氧化硅和小于或等于约11重量%氧化锆制造的纤芯,以及具有最大相对折射率 $\Delta_{1\text{最大值}}$ 。光纤还具有:内包层、第一外包层和第二外包层,所述内包层围绕纤芯且具有最小相对折射率 $\Delta_{2\text{最小值}}$,所述第一外包层围绕内包层以及所述第二外包层围绕第一外包层。第二外包层在1650°C的粘度减去第一外包层在1650°C的粘度大于 $0.1e^7$ 泊,且 $\Delta_{1\text{最大值}} > \Delta_{2\text{最小值}}$ 。单模光纤还可具有围绕内包层的由二氧化硅或SiON制造的外包层。第一外包层具有最大相对折射率 $\Delta_{3\text{最大值}}$, $\Delta_{3\text{最大值}} > \Delta_{2\text{最小值}}$ 。

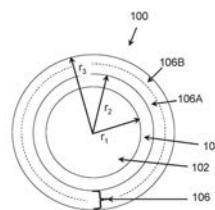


图 1A

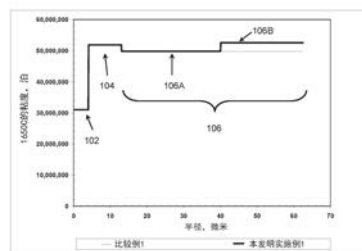


图 1B

1. 一种单模光纤,其包括:

纤芯,所述纤芯包含二氧化硅和小于或等于11重量%氧化锆,且具有最大相对折射率 $\Delta_{1\text{最大值}}$;

内包层,所述内包层围绕所述纤芯且具有最小相对折射率 Δ_2 ,使得 $\Delta_{1\text{最大值}} > \Delta_2$;

外包层,所述外包层围绕所述内包层且包括第一外包层部分和围绕所述第一外包层部分的第二外包层部分;其中,所述第二外包层部分在1650°C的粘度减去所述第一外包层部分在1650°C的粘度是 $\geq 1 \times 10^6$ 泊,

其中,(i)所述第二外包层部分包含的氯至少比所述第一外包层部分包含的氯少1000ppm,以重量计;或者(ii)所述第一外包层部分的平均氯浓度是2000-20000ppm,以重量计;或者(iii)所述第二外包层部分的氯浓度为0-6000ppm,以重量计,以及其中,所述第二外包层部分包含的氯至少比所述第一外包层部分包含的氯少1000ppm,以重量计。

2. 如权利要求1所述的单模光纤,其特征在于,所述第二外包层部分在1650°C的粘度减去所述第一外包层部分在1650°C的粘度是(i) $\geq 5 \times 10^6$ 泊;或者(ii) $\geq 1 \times 10^6$ 泊且 $\leq 1.6 \times 10^8$ 泊。

3. 如权利要求1所述的单模光纤,其特征在于,所述第一外包层部分具有玻璃软化点 $T_{\text{软化-1}}$,以及所述第二外包层部分具有玻璃软化点 $T_{\text{软化-2}}$;以及

所述第二外包层部分的玻璃软化点 $T_{\text{软化-2}}$ 与所述第一外包层部分的玻璃软化点 $T_{\text{软化-1}}$ 之间的差异大于2°C。

4. 如权利要求1-3中任一项所述的单模光纤,其特征在于,所述第一外包层部分具有玻璃软化点 $T_{\text{软化-1}}$,以及所述第二外包层部分具有玻璃软化点 $T_{\text{软化-2}}$;以及所述第二外包层部分的玻璃软化点 $T_{\text{软化-2}}$ 与所述第一外包层部分的玻璃软化点 $T_{\text{软化-1}}$ 之间的差异大于7°C。

5. 如权利要求1、2或3所述的单模光纤,其特征在于,符合以下至少一种情况:(i)纤芯包含大于或等于2.0重量%氧化锆;或者(ii)纤芯具有大于或等于0.13%至小于或等于0.52%的最大相对折射率 $\Delta_{1\text{最大值}}$;或者(iii) $-0.02\% \leq \Delta_2 \leq 0.02\%$ 。

6. 如权利要求1、2或3所述的单模光纤,其特征在于,所述纤芯的径向厚度大于或等于3微米至小于或等于10微米。

7. 如权利要求5所述的单模光纤,其特征在于,所述内包层的径向厚度大于或等于5微米。

8. 如权利要求1、2或3所述的单模光纤,其特征在于,所述第一外包层部分围绕所述内包层,

所述第一外包层部分包括氯掺杂的二氧化硅,

所述第一外包层部分具有相对折射率 Δ_{3A} ,以及

$\Delta_{3A} > \Delta_2$ 。

9. 如权利要求1、2或3所述的单模光纤,其特征在于,所述第二外包层部分围绕所述第一外包层部分,

所述第一外包层部分包括氯掺杂的二氧化硅且具有相对折射率 Δ_{3A} ,

所述第二外包层部分包括氯掺杂的二氧化硅、二氧化硅或SiON,以及

$\Delta_{3A} > \Delta_2$ 。

10. 如权利要求1、2或3所述的单模光纤,其特征在于,所述纤芯包含大于或等于2.0重

量%氧化锗。

11. 如权利要求1、2或3所述的单模光纤,其特征在于,所述纤芯包含大于或等于2.0重量%氧化锗,以及所述第二外包层部分的径向厚度大于或等于2微米至小于或等于25微米。

12. 如权利要求1所述的单模光纤,其特征在于,所述单模光纤在1550nm波长处的衰减小于或等于0.185dB/km。

13. 如权利要求1、2或3所述的单模光纤,所述单模光纤具有标准化的应力减轻参数 Φ , $\Phi \geq 5$ 。

14. 如权利要求13所述的单模光纤,所述单模光纤具有标准化的应力减轻参数 Φ , $100 \geq \Phi \geq 5$ 。

15. 如权利要求1、2或3所述的单模光纤,其特征在于,所述第二外包层部分处于拉伸,所述拉伸产生大于0.3MPa的轴向应力。

16. 如权利要求15所述的单模光纤,其特征在于,所述第二外包层部分处于拉伸,所述拉伸产生大于2MPa的轴向应力。

17. 一种光纤预成形件,其包括:

(i) 纤芯,所述纤芯包含二氧化硅和小于或等于11重量%氧化锗,且具有最大相对折射率 $\Delta_{1\text{最大值}}$;

(ii) 内包层,所述内包层围绕所述纤芯且具有最小相对折射率 Δ_2 ,使得 $\Delta_{1\text{最大值}} > \Delta_2$;以及

(iii) 外包层,所述外包层围绕所述内包层且包括第一外包层部分和围绕所述第一外包层部分的第二外包层部分;以及

其中,所述第二外包层部分在1650°C的粘度减去所述第一外包层部分在1650°C的粘度 $\geq 1 \times 10^6$ 泊,以及

其中,(i)所述第二外包层部分包含的氯至少比所述第一外包层部分包含的氯少1000ppm,以重量计;或者(ii)所述第一外包层部分的平均氯浓度是2000-20000ppm,以重量计;或者(iii)所述第二外包层部分的氯浓度为0-6000ppm,以重量计,以及其中,所述第二外包层部分包含的氯至少比所述第一外包层部分包含的氯少1000ppm,以重量计。

18. 如权利要求17所述的光纤预成形件,其特征在于,所述第二外包层部分在1650°C的粘度减去所述第一外包层部分在1650°C的粘度 $\geq 5 \times 10^6$ 泊。

19. 如权利要求17所述的光纤预成形件,其特征在于,所述第二外包层部分在1650°C的粘度减去所述第一外包层部分在1650°C的粘度 $\geq 1 \times 10^6$ 泊且 $\leq 1.6 \times 10^8$ 泊。

20. 如权利要求17、18或19所述的光纤预成形件,其特征在于,所述第一外包层部分具有玻璃软化点 $T_{\text{软化-1}}$,以及所述第二外包层部分具有玻璃软化点 $T_{\text{软化-2}}$;以及

所述第二外包层部分的玻璃软化点 $T_{\text{软化-2}}$ 与所述第一外包层部分的玻璃软化点 $T_{\text{软化-1}}$ 之间的差异大于2°C。

21. 如权利要求20所述的光纤预成形件,其特征在于,所述第一外包层部分具有玻璃软化点 $T_{\text{软化-1}}$,以及所述第二外包层部分具有玻璃软化点 $T_{\text{软化-2}}$;以及

所述第二外包层部分的玻璃软化点 $T_{\text{软化-2}}$ 与所述第一外包层部分的玻璃软化点 $T_{\text{软化-1}}$ 之间的差异大于3°C。

22. 如权利要求20所述的光纤预成形件,其特征在于,所述第一外包层部分具有玻璃软

化点 $T_{\text{软化-1}}$,以及所述第二外包层部分具有玻璃软化点 $T_{\text{软化-2}}$;以及

所述第二外包层部分的玻璃软化点 $T_{\text{软化-2}}$ 与所述第一外包层部分的玻璃软化点 $T_{\text{软化-1}}$ 之间的差异大于 7°C 。

23. 一种对光纤进行拉制的方法,其包括:

(i) 提供光纤预成形件,其包括:

(a) 纤芯,所述纤芯包含二氧化硅和小于或等于11重量%氧化锆,且具有最大相对折射率 $\Delta_{1\text{最大值}}$;

(b) 内包层,所述内包层围绕所述纤芯且具有最小相对折射率 Δ_2 ,使得 $\Delta_{1\text{最大值}} > \Delta_2$;

(c) 外包层,所述外包层围绕所述内包层且包括第一外包层部分和围绕所述第一外包层部分的第二外包层部分;以及其中,所述第二外包层部分在 1650°C 的粘度减去所述第一外包层部分在 1650°C 的粘度是 $\geq 1 \times 10^6$ 泊,其中,(i)所述第二外包层部分包含的氯至少比所述第一外包层部分包含的氯少1000ppm,以重量计;或者(ii)所述第一外包层部分的平均氯浓度是2000-20000ppm,以重量计;或者(iii)所述第二外包层部分的氯浓度为0-6000ppm,以重量计,以及其中,所述第二外包层部分包含的氯至少比所述第一外包层部分包含的氯少1000ppm,以重量计;以及

(ii) 从预成形件拉制光纤。

24. 如权利要求23所述的方法,其特征在于,所述第一外包层部分具有玻璃软化点 $T_{\text{软化-1}}$,以及所述第二外包层部分具有玻璃软化点 $T_{\text{软化-2}}$;以及所述第二外包层部分的玻璃软化点 $T_{\text{软化-2}}$ 与所述第一外包层部分的玻璃软化点 $T_{\text{软化-1}}$ 之间的差异大于 2°C 。

具有应力消除层的低衰减光纤、其预成形件及其制造方法

[0001] 本申请根据35 U.S.C. §119, 要求2015年4月7日提交的美国临时申请系列第62/143929号的优先权, 本文以该申请为基础并将其全文通过引用结合于此。

技术领域

[0002] 本公开一般地涉及光纤, 更具体地涉及低衰减光纤。

背景技术

[0003] 近来, 在电信领域, 对具有低衰减的玻璃光纤报以很大的关注。用于改善衰减性质的技术会在许多类型的光纤中起到重要作用, 包括: 用于与长距离应用的传输光纤, 用于家庭光纤应用新兴领域的多模光纤, 以及色散补偿光纤(其中, 弯曲损耗对实际使用的许多设计造成限制)。在某些应用中, 例如长距离应用中, 希望低衰减以通过光信号准确地传输数据。提出的用来解决这个问题的许多方案涉及对光纤及其折射率分布进行明显改性。

发明内容

[0004] 根据本文所示和所述的一个或多个实施方式, 单模光纤具有纤芯, 其是由二氧化硅和小于或等于约11重量%的氧化锗制造的, 并且最大相对折射率为 $\Delta_{1\text{最大值}}$ 。光纤还具有围绕纤芯且相对折射率为 Δ_2 的内包层, 以及外包层。外包层包括围绕纤芯和内包层的第一外包层部分, 以及围绕第一外包层部分的第二外包层部分。第二外包层部分在1650°C的粘度减去第一外包层部分在1650°C的粘度 $\geq 1 \times 10^6$ 泊。在一些实施方式中, 第二外包层部分在1650°C的粘度减去第一外包层部分在1650°C的粘度 $\geq 5 \times 10^6$ 泊。在一些实施方式中, 第二外包层部分在1650°C的粘度减去第一外包层部分在1650°C的粘度 $\geq 0.1 \times 10^7$ 泊且 $\leq 1.6 \times 10^8$ 泊。

[0005] 根据本文所示和所述的一个或多个实施方式, 单模光纤具有纤芯, 其是由二氧化硅和小于或等于约11重量%的氧化锗制造的, 并且最大相对折射率为 $\Delta_{1\text{最大值}}$ 。光纤还具有围绕纤芯且相对折射率为 Δ_2 的内包层, 以及外包层。外包层包括围绕纤芯和内包层的第一外包层部分, 以及围绕第一外包层部分的第二外包层部分。第二外包层部分的玻璃软化点与第一外包层部分的玻璃软化点之间的差异大于或等于2°C。在一些实施方式中, 第二外包层部分的玻璃软化点与第一外包层部分的玻璃软化点之间的差异大于或等于3°C(例如, 3-100°C, 例如3-25°C)。在一些实施方式中, 第二外包层部分的玻璃软化点与第一外包层部分的玻璃软化点之间的差异大于或等于7°C(例如, 7-100°C)。在一些实施方式中, 第二外包层部分的玻璃软化点与第一外包层部分的玻璃软化点之间的差异是7°C(例如, 7-20°C)。根据本文所示和所述的一些实施方式, 外包层的第二部分由二氧化硅或SiON制造。第一外包层部分具有最大相对折射率 $\Delta_{3\text{最大值}}$, $\Delta_{3\text{最大值}} > \Delta_2$ 。

[0006] 根据一些实施方式, 第一外包层部分包括氯掺杂的二氧化硅, 以及具有折射率 Δ_{3A} , $\Delta_{3A} > \Delta_2$ 。

[0007] 根据一些实施方式, 纤芯的外半径为3-10微米, 以及内包层的径向厚度至少为5微

米。

[0008] 根据一些实施方式,第一外包层部分包括氯掺杂的二氧化硅和具有相对折射率 Δ_3 ,以及第二外包层部分包括氯掺杂的二氧化硅、二氧化硅或SiON。

[0009] 根据一些实施方式,第二外包层部分包含的氯比第一外包层部分少。

[0010] 根据一些实施方式,拉制光纤的方法包括:

[0011] (i) 提供光纤预成形件,其包含:(a) 纤芯,其包含二氧化硅和小于或等于约11重量%的氧化锆以及具有最大相对折射率 $\Delta_{1\text{最大值}}$;(b) 内包层,其围绕纤芯且具有最小相对折射率 Δ_2 , $\Delta_{1\text{最大值}} > \Delta_2$;(c) 外包层,其围绕内包层且包括第一外包层部分和围绕第一外包层部分的第二外包层部分,其中,第二外包层部分的玻璃软化点与第一外包层部分的玻璃软化点之间的差异至少为 2°C ;以及

[0012] (ii) 从预成形件拉制光纤。

[0013] 根据一些实施方式,拉制光纤的方法包括:

[0014] (i) 提供光纤预成形件,其包含:(a) 纤芯,其包含二氧化硅和小于或等于约11重量%的氧化锆以及具有最大相对折射率 $\Delta_{1\text{最大值}}$;(b) 内包层,其围绕纤芯且具有最小相对折射率 Δ_2 , $\Delta_{1\text{最大值}} > \Delta_2$;(c) 外包层,其围绕内包层且包括第一外包层部分和围绕第一外包层部分的第二外包层部分,其中,第二外包层部分在 1650°C 的粘度减去第一外包层部分在 1650°C 的粘度 $\geq 0.1\text{e}^7$ 泊;以及

[0015] (ii) 从预成形件拉制光纤。

[0016] 根据一些实施方式,拉制光纤的方法包括:

[0017] (i) 提供光纤预成形件,其包含:(a) 纤芯,其包含二氧化硅和小于或等于约11重量%的氧化锆以及具有最大相对折射率 $\Delta_{1\text{最大值}}$;(b) 内包层,其围绕纤芯且具有最小相对折射率 Δ_2 , $\Delta_{1\text{最大值}} > \Delta_2$;(c) 外包层,其围绕内包层且包括第一外包层部分和围绕第一外包层部分的第二外包层部分,其中,第二外包层部分的玻璃软化点与第一外包层部分的玻璃软化点相比至少差 2°C ;以及

[0018] (ii) 从预成形件拉制光纤。

[0019] 在以下的详细描述中提出了本文实施方式的其他特征和优点,其中的部分特征和优点对本领域的技术人员而言,根据所作描述就容易看出,或者通过实施包括以下详细描述、权利要求书以及附图在内的本文所述的各种实施方式而被认识。

[0020] 应理解,前面的一般性描述和以下的详细描述都只是呈现本发明的实施方式,用来提供理解要求保护的本文实施方式的性质和特性的总体评述或框架。包括的附图提供了对实施方式的进一步的理解,附图被结合在本说明书中并构成说明书的一部分。附图说明了实施方式,并与说明书一起用来解释实施方式的原理和操作。

附图说明

[0021] 图1A是根据本文所示和所述的一个或多个实施方式的光纤的横截面示意图;

[0022] 图1B图示性显示根据本文所示和所述的一个或多个实施方式的光纤在 1650°C 的粘度与半径的关系,以及比较例光纤在 1650°C 的粘度与半径的关系;

[0023] 图2A、2B和2C图示性显示图1A所示的光纤的数个实施方式的折射率与半径关系;

[0024] 图2D图示性显示典型商用光纤的折射率与半径关系;

[0025] 图3是根据本文所示和所述的一个或多个实施方式用于拉制光纤的系统示意图;

[0026] 图4A显示不同光纤分布设计的建模轴向应力;

[0027] 图4B显示6500g二氧化硅烟盒预成形件的较外部分在使得预成形件两次横向通过热区之后的致密化;以及

[0028] 图4C图示性显示以两种不同张力拉制的实施方式中,在第二外包层部分中的轴向应力与光纤的应力消除参数 Φ 的关系。

具体实施方式

[0029] 图1A示意性绘出了根据本文所示和所述的一个或多个实施方式的光纤100的横截面。本文所述的光纤100的实施方式通常包括单模光纤,其具有纤芯102,所述纤芯102是由二氧化硅(SiO_2)和氧化锗(GeO_2)制造的,具有小于或等于约11重量%的氧化锗。图2A-2C图示性显示图1A所示的光纤100的数个实施方式的示例性折射率分布与半径关系。光纤纤芯102(本文也称作芯层和芯部分)具有最大相对折射率 $\Delta_{1\text{最大值}}$ (相对于二氧化硅而言)。光纤100还具有围绕纤芯102的内包层104(本文也称作内包覆层),其具有相对折射率 Δ_2 , $\Delta_{1\text{MAX}} > \Delta_2$ 。外包层106围绕内包层104。外包层106(本文也称作外包覆)包括两个部分:第一外包层部分106A(本文也称作第一外包覆层)和第二外包层部分106B(本文也称作第二外包覆层或者第二外包层)。外包层106的106A部分与内包层104直接相邻,并且具有相对折射率 Δ_{3A} ,其中, $\Delta_{1\text{最大值}} > \Delta_{3A} > \Delta_2$ 。外部层106的部分106B围绕外包层部分106A,以及与第一外包层部分106A直接相邻。根据一些光纤实施方式,第二外包层部分106B具有平均相对折射率 Δ_{3B} , $\Delta_{3A} > \Delta_{3B}$ 。根据一些实施方式, $(\Delta_{3A} - \Delta_{3B}) \geq 0.02\%$ 。根据一些实施方式, $(\Delta_{3A} - \Delta_{3B}) \geq 0.08\%$ 。根据一些实施方式, $(\Delta_{3A} - \Delta_{3B}) \geq 0.14\%$ 。根据一些实施方式, $0.2\% \geq (\Delta_{3A} - \Delta_{3B}) \geq 0.02\%$ 。根据一些实施方式, $0.2\% \geq (\Delta_{3A} - \Delta_{3B}) \geq 0.05\%$ 。根据一些其他实施方式, $0.14\% \geq (\Delta_{3A} - \Delta_{3B}) \geq 0.05\%$ 。根据一些其他实施方式, $0.14\% \geq (\Delta_{3A} - \Delta_{3B}) \geq 0.08\%$ 。在一些实施方式中,内包层104的相对折射率等于第二外包层(第二外包层部分)106B的平均相对折射率,以及层104和106B都基本包含二氧化硅。应理解的是,玻璃层(106A、106B)的组成决定了每层的折射率(折射率 Δ)。包层106的最外层部分(或者第二外包层部分106B)是应力消除层,其1)降低了置于内包层104和纤芯102上的拉伸应力,这导致较低的光纤衰减;2)同时实现了光纤具有优异的弯曲性能(低的宏弯曲损耗)。在所揭示的实施方式中,包层106的第二外包层部分106B的软化点高于包层106的第一外包层部分106A的软化点。如本文所用,当提及本文所揭示的实施方式的软化点“差异”时,包层106的第二外包层部分106B的软化点高于包层106的第一外包层部分106A的软化点。根据本文所述的一些实施方式,第二外包层部分106B的玻璃软化点($T_{\text{软化}} = T_{\text{软化}-2} = T_{\text{Si106B}}$)与第一外包层部分106A的玻璃软化点($T_{\text{软化}} = T_{\text{软化}-1} = T_{\text{Si106A}}$)大于或等于约 2°C (即, $T_{\text{Si106B}} - T_{\text{Si106A}} \geq 2^\circ\text{C}$,例如在一些实施方式中, $150^\circ\text{C} > T_{\text{Si106B}} - T_{\text{Si106A}} \geq 2^\circ\text{C}$,优选地, $100^\circ\text{C} > T_{\text{Si106B}} - T_{\text{Si106A}} \geq 2^\circ\text{C}$)。在本文所述的一些其他实施方式中,第二外包层部分106B的玻璃软化点与第一外包层部分106A的玻璃软化点之间的差异大于或等于 3°C (即, $T_{\text{Si106B}} - T_{\text{Si106A}} \geq 3^\circ\text{C}$ (例如,在一些实施方式中, $100^\circ\text{C} > T_{\text{Si106B}} - T_{\text{Si106A}} \geq 3^\circ\text{C}$))。在本文所述的一些其他实施方式中,第二外包层部分106B的玻璃软化点(温度 $T_{\text{软化}}$,即, $T_{\text{软化}} = T_{\text{Si106B}}$)与第一外包层部分106A的玻璃软化点(温度 $T_{\text{软化}}$,即, $T_{\text{软化}} = T_{\text{Si106A}}$)之间的差异大于或等于 7°C (即, $T_{\text{Si106B}} - T_{\text{Si106A}} \geq 7^\circ\text{C}$,例如,在一些实施方式中, $100^\circ\text{C} > T_{\text{Si106B}} - T_{\text{Si106A}} \geq 7^\circ\text{C}$)。在一

些实施方式中, $50^{\circ}\text{C} > T_{\text{S106B}} - T_{\text{S106A}} \geq 7^{\circ}\text{C}$ 。这两层106A和106B的软化点与这些层的玻璃粘度有关。应理解的是, 外包层部分106A和106B的软化点是玻璃组合物的粘度为 $10^{7.6}$ 泊的温度 $T_{\text{软化}}$ 。

[0030] 长途传输商业光纤的典型分布如图2D所示(比较例光纤)。该比较例光纤包括: 氧化锗(GeO_2)掺杂的纤芯, 其被基本包含纯二氧化硅的内包层围绕, 以及基于二氧化硅的单层外包层, 其经过均匀的正掺杂以增加外包层相对于内包层的折射率。在此类商业光纤中, 经过正掺杂的外包层通常是通过用正掺杂剂(例如, 氯, 采用诸如氯、 SiCl_4 等掺杂剂前体; 氧化锗或氧化铝)对外包层进行掺杂所实现的。申请人发现, 用于商用光纤的外包层中的掺杂剂导致外包层的粘度相比于内包层的粘度发生下降, 使得刚性的内包层携带了在此类比较例光纤的拉制期间所诱发的最大应力。此类商业光纤的内包层中的拉伸负荷增加导致对进行光纤拉制过程中玻璃所发生的结构松弛产生负面影响, 从而增加了所得到的光纤的衰减。更具体来说, 不希望受限于理论, 申请人相信, 在此类商业光纤中, 由于外包层相比于内包层更软, 在拉制时诱发的应力导致内包层相比于纤芯和外包层处于张力状态, 这导致较高的光纤衰减。

[0031] 相反地, 为了降低内包层104中的应力, 申请人采用外包覆106, 其具有刚性应力消除层(第二外包层部分106B)作为光纤100的外包层106的最外部分。根据本文所揭示的实施方式, 第一外包层部分106A的粘度低于内包层104的粘度, 但是第二外包层部分106B(应力消除层)的粘度高于第一外包层部分106A的粘度。优选地, 第二外包层部分106B的粘度还大于或等于内包层104的粘度。例如, 在一个实施方式中, 外包层的外包层部分106B没有经过掺杂(即, 是纯二氧化硅或者基本纯的二氧化硅)并且是光纤的应力消除层。在另一个实施方式中, 第二外包层部分106B的平均正掺杂剂量低于第一外部分106A。在一些实施方式中, 优选地, 106B部分比光纤100的纤芯102或者内包层104更为刚性。

[0032] 如本文所用, 正掺杂剂是增加玻璃相对于纯二氧化硅的折射率的材料或掺杂剂。此类正掺杂剂可以是例如, 氯、氧化锗、N、磷、氧化钛或氧化铝。

[0033] 如本文所用, 负掺杂剂是降低玻璃相对于纯二氧化硅的折射率的材料或掺杂剂。此类负掺杂剂可以是F(氟)或 B_2O_3 。

[0034] 在本文中, “折射率分布”是折射率或相对折射率与光纤的径向横截面的光纤半径之间的关系。

[0035] 在本文中, “相对折射率”定义如下:

$$[0036] \quad \Delta_i \% = 100 \times \frac{(n_i^2 - n_{\text{ref}}^2)}{2n_i^2}$$

[0037] 除非另外说明, 式中 n_i 是区域i的最大折射率; 除非另外说明, n_{ref} 是纯二氧化硅玻璃的折射率。因此, 在本文中, 相对折射率百分数是相对于纯二氧化硅玻璃的。术语 Δ 、 Δ 折射率、 Δ 折射率百分比、 $\Delta\%$ 在本文可互换使用。

[0038] 更具体来说, 在本文中, $\Delta_{1\text{最大值}}$ 表示光纤的纤芯的最大相对折射率, $\Delta_{2\text{最小值}}$ 表示光纤的内包层的最小相对折射率, 以及 $\Delta_{3\text{最大值}}$ 表示光纤的第一外包层部分106A的最大相对折射率。相对折射率是基于纯二氧化硅玻璃的折射率的百分数。

[0039] 应理解的是, 本文所用的词语“纯二氧化硅玻璃”指的是包含“纯二氧化硅玻璃”的光纤的区域或层不含会显著改变二氧化硅玻璃区域或部分的折射率的量的材料, 例如掺杂

剂和/或其他痕量材料。但是,在被称作“二氧化硅”或“纯二氧化硅”的光纤的区域或部分中可以存在少量掺杂剂(例如,分别小于1500ppm的氯和/或氟的量)。

[0040] 除非另外说明,否则在本文中,将“色散”称作“分散”,波导光纤的色散是材料色散与波导色散之和。零色散波长是色散值为0的波长,本文也称作 λ_0 或 λ_0 。色散斜率表示色散相对于波长的变化率。

[0041] “有效面积”如下等式1所定义:

$$A_{\text{有效}} = 2\pi (\int f^2 r dr)^2 / (\int f^4 r dr) \quad (\text{等式1})$$

[0043] 其中,积分限为0至 ∞ , f 是与波导中所传播的光相关的电场的横向分量。如本文所用,“有效面积”或“ $A_{\text{有效}}$ ”指的是波长为1550nm的光学有效面积,除非另有说明。

[0044] 术语“ α -分布”(本文也称作 α 分布或者仅仅称作 α)指的是纤芯区域的相对折射率分布,其表述为 $\Delta(r)$,单位是“%”,其中, r 是半径。 Δr 表示为等式2:

$$\Delta(r) = \Delta(r_0) (1 - [|r-r_0| / (r_1-r_0)]^\alpha) \quad (\text{等式2})$$

[0046] 式中, r_0 是 $\Delta(r)$ 为最大值的点, r_1 是 $\Delta(r)$ 为零的点,以及 r 的范围是 $r_i < r < r_f$,其中 Δ 如上文所定义, r_i 是 α -分布的起点, r_f 是 α -分布的终点, α 是指数,为实数。

[0047] 采用分别如下等式3和4所示的彼得曼II方法来测量模场直径(MFD),其中,

$$2w = \text{MFD} \quad (\text{等式3})$$

[0049] 以及

$$w^2 = (2 \int f^2 r dr / \int [df/dr]^2 r dr) \quad (\text{等式4})$$

[0051] 其中,积分限是0至 ∞ 。

[0052] 波导光纤的抗弯曲性可以通过规定测试条件下所诱发的衰减进行度量,例如通过将光纤绕着规定直径的心轴配置或缠绕,例如绕着6mm、10mm、20mm、30mm或者类似直径的心轴缠绕1圈(例如,“1x 10mm直径宏弯曲损耗”或“1x 30mm直径宏弯曲损耗”),并测量每圈的衰减增加。

[0053] 一种弯曲测试类型是横向负荷微弯曲测试。在所谓的“横向负荷丝网”测试(LLWM)中,将指定长度的波导光纤放置在两块平板之间。将70号金属丝网连接到其中一块板上。将已知长度的波导光纤夹在所述板之间,用30牛的力将所述板压在一起的同时,测量参比衰减。然后向板施加70牛顿的作用力,并测量衰减增加,单位为dB/m。衰减的增加是规定波长(通常在1200-1700nm范围内,例如,1310nm或1550nm或1625nm)处的波导的横向负荷衰减,单位dB/m。

[0054] 使用“销杆阵列(pin array)”弯曲测试比较波导光纤对弯曲的相对耐受性。为了进行该测试,对于处于基本无诱发弯曲损耗的波导光纤,测量衰减损耗。然后将波导光纤绕着销杆阵列编织,并再次测量衰减。由于弯曲诱发的损耗是两次测得的衰减之差。在一些实施方式中,销杆阵列是一组十个圆柱形的销杆,它们排成单排,在平坦的表面上保持固定的垂直位置。销杆阵列的中心-中心间距为5mm,销杆直径为0.67mm。在测试过程中,施加足够的张力,使得波导光纤顺应一部分的销杆表面。衰减的增加是规定波长(通常在1200-1700nm范围内,例如,1310nm或1550nm或1625nm)处的波导的销杆阵列衰减,单位dB。

[0055] 对于给定模式,理论光纤截止波长、“理论光纤截止”或者“理论截止”是高于该波长导光无法以该模式发生传播的波长。数学定义可参见“单模光纤(Single Mode Fiber Optics)”,Jeunhomme,第39-44页,Marcel Dekker,纽约,1990,其中,将理论光纤截止描述

为模式传播常数变得等于外包层中的平面波传播常数的波长。该理论波长适用于不具有直径变化的无限长的完美直光纤。

[0056] 光纤截止采用标准2m光纤截止测试 (FOTP-80 (EIA-TIA-455-80)) 测量, 得到“光纤截止波长”, 也被称作“2m光纤截止”或者“测量截止”。通过进行FOTP-80标准测试从而使用受控量的弯曲提取出较高级的模式, 或者将光纤的光谱响应标准化至多模光纤的光谱响应。

[0057] 对于本文所用的光缆截止波长(或者“光缆截止”), 指的是EIA-445光纤光学测试步骤所述的22m光缆截止测试, 其是EIA-TIA光纤光学标准的一部分, 即电子工业联盟-电信工业联盟光纤光学标准 (Electronics Industry Alliance-Telecommunications Industry Association Fiber Optics Standards)。

[0058] 除非本文另有说明, 否则光学性质(例如, 色散、色散斜率等)报道是LP01模式的。

[0059] 术语软化点定义为玻璃粘度为 $10^{7.6}$ 泊(1泊(P) = 0.1帕斯卡·秒(Pa·S))时的温度。

[0060] 计算每层光纤层(在1650°C)的粘度乘以该层的面积, 记录为泊·微米²。

[0061] 标准化应力减轻参数 Φ 是无量纲参数, 其与光纤的应力减轻层的应力承载能力成比例, 计算如下:

$$[0062] \quad \Phi = 1000 \cdot (\Omega - \Psi) \quad (\text{等式5})$$

[0063] 其中, 无量纲参数 Ω 和 Ψ 的计算如下所示。

[0064] 参数 Ω 定义为粘度乘以第二外包覆层106B的面积($\eta_{20C} A_{106B}$), 相对于粘度乘以整个光纤的面积($\eta_{\text{光纤}} A_{\text{光纤}}$)标准化, 计算如等式6所示:

$$[0065] \quad \Omega = \int_{r_{3A}}^{r_3} \eta_{20C}(r) r dr \left/ \left(\int_{r_{3A}}^{r_3} \eta_{20C}(r) r dr + \int_{r_2}^{r_{3A}} \eta_{10C}(r) r dr + \int_{r_1}^{r_2} \eta_{1C}(r) r dr + \int_0^{r_1} \eta_{\text{纤芯}}(r) r dr \right) \right.$$

(等式6)

[0066] 式中, $\eta_{\text{纤芯}}$ 、 η_{1C} 、 η_{10C} 、 η_{20C} 分别是纤芯、内包层、外包层106的第一外包层部分106A和第二外包层部分106B(在1650°C的)粘度。该等式可以还原至等式6.1所示的一般形式。

$$[0067] \quad \Omega = \int_{r_{3A}}^{r_3} \eta(r) r dr \left/ \left(\int_0^{r_3} \eta(r) r dr \right) \right. \quad (\text{等式6.1})$$

[0068] 在等式6(和等式6.1)中, 参数 r_0 、 r_1 、 r_2 、 r_{3A} 和 r_3 分别是光纤中心的径向位置、纤芯102的外半径、内包层104的外半径、第一外包层部分106A的外半径和第二外包层部分106B的外半径。

[0069] 等式5中的参数 Ψ 是相对于整个光纤面积标准化的应力减轻光纤层的应力减轻面积(即, 第二外包覆层106B的面积), 采用等式7计算:

$$[0070] \quad \Psi = \int_{r_{3A}}^{r_3} r dr \left/ \left(\int_0^{r_3} r dr \right) \right. \quad (\text{等式7})$$

[0071] 在等式5-7中, 光纤的任意径向位置处的局部粘度作为与给定光纤层的局部玻璃组成相关进行评估, 例如, 具有如下关系式:

$$[0072] \quad \eta(\text{单位, 泊}) = 10^{\wedge} [\log[\eta_0] - 0.0319[\text{GeO}_2] - 0.058[\text{Cl}] - 0.4424[\text{F}] + 3.02[\text{N}]]$$

[0073] (等式8)

[0074] 其中, \log 是底数为10的对数, $[\text{GeO}_2]$ 、 $[\text{Cl}]$ 、 $[\text{F}]$ 和 $[\text{SiON}]$ 分别是氧化锗、氯、氟和SiON掺杂剂的局部重量%, 以及 η_0 是纯二氧化硅(即, 没有掺杂剂的二氧化硅玻璃)的粘度, 其符合如下等式9:

[0075] η_0 (单位, 泊) = $\text{Exp}[-13.738 + (60604.7/T)]$ (等式9)

[0076] 以及, 其中, T 是温度, 单位是开尔文度, K 。上述粘度关系被用于计算玻璃的软化点($T_{\text{软化}}$, 单位是摄氏度, C)与玻璃组成的关系, 如等式10所示:

[0077] $T_{\text{软化}}(C) = 60604.7 / \{ \ln [10^{(7.6 + 0.0319[\text{GeO}_2] + 0.058[\text{Cl}] + 0.4424[\text{F}] - 3.02[\text{N}])}] + 13.738 \} - 273$

[0078] (等式10)

[0079] 其中, \ln 是自然对数。采用这些等式计算光纤中每层的粘度和软化点。例子如下所示。

[0080] 参见图1A和1B以及图2A-2C, 显示根据本文所述实施方式的光纤100的横截面图。光纤100通常包括玻璃纤芯102, 内包层104围绕纤芯102。外包层106围绕内包层104。纤芯102、内包层104和外包层106可包括二氧化硅, 具体来说, 基于二氧化硅的玻璃。纤芯102和内包层104可包括掺杂剂, 如本文更详细所述。光纤100的截面通常可以相对于纤芯102的中心是大致圆形对称的, 纤芯102可以具有半径 r_1 。内包层104围绕纤芯102, 从半径 r_1 延伸到半径 r_2 , 使得内包层的径向厚度 $T_2 = r_2 - r_1$ 。外包层106围绕内包层104, 从半径 r_2 延伸到半径 r_3 , 使得外包层的径向厚度 $T_3 = r_3 - r_2$ 。因此, 光纤100(例如, 纤芯102、内包层104和外包层106)可以具有外直径 $2r_3$ 。第一外包层部分106A与内包层104直接相邻, 并且从半径 r_2 延伸到半径 r_{3A} 。第二外包层部分106B围绕第一外包层部分106A, 并且从半径 r_{3A} 延伸到外半径 r_3 。

[0081] 如本文所述, 光纤100的芯102具有半径 r_1 和径向厚度 $T_1 = r_1$ 。在一些实施方式中, 光纤100是单模光纤。纤芯102可以具有大于或等于约3.0微米, 例如大于或等于约4.0微米的径向厚度。纤芯可以具有小于或等于约10微米, 例如大于或等于约7.0微米的径向厚度。因此, 在一些实施方式中, 径向厚度 T_1 可以是大于或等于约3.0微米至小于或等于约8.0微米, 例如, 大于或等于约4.0微米至小于或等于约7.0微米(例如, 4.5-6微米)。在其他实施方式中, 径向厚度 T_1 可以约为5.0微米。但是, 应理解的是, 纤芯102可以具有不同的尺寸, 以有助于各种其他单模实施方式。

[0082] 在一些实施方式中, 纤芯102包含二氧化硅玻璃(SiO_2)以及一种或多种提升折射率的掺杂剂(本文称作正掺杂剂), 例如, GeO_2 、 Cl 、 Al_2O_3 、 P_2O_5 、 TiO_2 、 ZrO_2 、 Nb_2O_5 和/或 Ta_2O_5 。

[0083] 在一些实施方式中, 用 GeO_2 正掺杂纤芯102。例如, 纤芯102可以用小于或等于约11重量%的 GeO_2 , 例如小于或等于约9.0重量%的 GeO_2 进行正掺杂。纤芯102可以用小于或等于约8.5重量%的 GeO_2 进行正掺杂。在一些实施方式中, 纤芯102可以用大于或等于约2.0重量%的 GeO_2 , 例如大于或等于约2.5重量%的 GeO_2 进行正掺杂。在一些实施方式中, 纤芯102可以用大于或等于约3.0重量%的 GeO_2 , 例如大于或等于约3.5重量%的 GeO_2 进行正掺杂。因此, 在一些实施方式中, 纤芯102可以包含大于或等于约2.0重量%至小于或等于约9.5重量%的 GeO_2 , 或者大于或等于约2.5重量%至小于或等于约8.0重量%的 GeO_2 。

[0084] 在纤芯102进行正掺杂的实施方式中, 纤芯102的最大相对折射率 $\Delta_{1\text{最大值}}$ 可以大于或等于约0.2%, 例如大于或等于约0.23%或0.25%。在一些实施方式中, 最大相对折射率

$\Delta_{1\text{最大值}}$ 可以大于或等于约0.30%，例如大于或等于约0.35%。在一些实施方式中，最大相对折射率 $\Delta_{1\text{最大值}}$ 可以小于或等于约0.5%，例如小于或等于约0.45%。因此，在一些实施方式中，最大相对折射率 $\Delta_{1\text{最大值}}$ 可以大于或等于约0.23%至小于或等于约0.45%。在一些实施方式中，最大相对折射率 $\Delta_{1\text{最大值}}$ 可以小于或等于约0.4%。在一些实施方式中，纤芯102的相对折射率分布的分布参数 α 的值大于5。在一些其他实施方式中，纤芯102的相对折射率分布的分布参数 α 是1.5-5。

[0085] 如上文所述，光纤100还可包括内包层104。在一些实施方式中，内包层104的径向厚度 $T_2=r_2-r_1$ 。内包层104的径向厚度 T_2 可以取决于所需的纤芯102的尺寸以及所需的光纤100的玻璃部分的尺寸和性质。在一些示例性实施方式中，内包层可以具有大于或等于约5微米，例如大于或等于约7微米的径向厚度。因此，在一些实施方式中，内包层104的径向厚度可以是大于或等于约5微米至小于或等于约25微米，例如，大于或等于约6微米至小于或等于约20微米。

[0086] 在一些示例性实施方式中，光纤100的内包层104可以基本上包含二氧化硅。也就是说，在这些实施方式中，内包层104主要包含二氧化硅，具有痕量水平的掺杂剂（例如，氯、氟等），浓度小于1500ppm。

[0087] 在一些实施方式中，内包层的相对折射率 Δ_2 是0.02%至0.04% Δ 。例如，内包层104的最小相对折射率 Δ_2 可以是0至0.02% Δ （相对于纯二氧化硅），例如，0%至0.015% Δ 。

[0088] 如上文所述以及如图1A、1B和2A-2C所示，光纤100还包括外包层106。外包层106的径向厚度 $T_3=r_3-r_2$ 。在一些实施方式中，外包层106的径向厚度 T_3 可以小于或等于约55微米，例如小于或等于约50微米。在一些实施方式中，外包层106的径向厚度 T_3 可以小于或等于约45微米，例如小于或等于约40微米。在一些实施方式中，外包层的内部分（即，第一外包层部分106A）用氯进行正掺杂，氯的重量%是2000-20000ppm。第一外包层部分106A的相对折射率是0.02%至0.2% Δ 。

[0089] 在一些实施方式中，包层106的第二外包层（或者最外外包层）部分106B包括纯二氧化硅玻璃。因此，在这些实施方式中，外包层的平均相对折射率 Δ_{3B} 约为0.0%，因为如本文所述，相对折射率是相对于纯二氧化硅玻璃的折射率测量的。此外，根据一些实施方式，第二外包层部分106B会是刚性的，即，（相比于纤芯102、内包层104以及外包层106的第一部分106A）会具有更高粘度，因为其未经正掺杂，或者正掺杂的情况小于第一外包层部分106A。

[0090] 例如，图2A显示三种不同光纤分布，其中，第一外包层部分106A用氯正掺杂（氯掺杂的二氧化硅），其从14微米处开始并在三个不同的径向位置终结（40微米、50微米和55微米），之后是基于二氧化硅的层（对应于第二外包层部分106B），其掺杂剂浓度较低（相对于正掺杂的第一外包层部分106A）或者不含掺杂剂。因此，这些光纤中的第二外包层部分106B的粘度高于正掺杂的第一外包层部分106A。此外，对于这些光纤，外包层106的最外包层部分或者第二外包层部分106B比第一外包层部分106A更为刚性。随着负担了刚性第二外包层部分106B的外拉伸厚度的增加，内包层104中的应力减小（参见图4A）。

[0091] 在一些其他实施方式中，包层106的第二外包层部分106B包括SiON。因此，在这些实施方式中，第二外包层部分106B的最大相对折射率 Δ_{3B} 高于纯二氧化硅，因为N（氮）提升

了二氧化硅的折射率。此外,相比于纤芯102、内包层104和第一外包层部分106A,这些实施方式的第二外包层部分106B会是刚性的(更高的粘度),因为SiON掺杂的玻璃的粘度高于纯二氧化硅的粘度。

[0092] 此外,根据一些实施方式,外包层部分106A和106B中的正掺杂剂的浓度可以相对于彼此调节,从而使得第一外包层部分106A的玻璃粘度低于第二外包层部分106B的情况。

[0093] 图1B图示性显示根据本文所示和所述的一个或多个实施方式的光纤(粗线)以及比较例光纤(细线)在1650°C的粘度与半径的关系。图1B的两个光纤的粘度曲线在最高至约40微米的径向距离是类似的。但是,常规光纤不具有本文所揭示的光纤实施方式中所显示出来的提升区域106B。常规长途光纤中的外包层106的粘度通常是均匀的,因为常规长途光纤中的典型外包层是由相同材料制造的(即,具有均匀组成)。申请人发现,使得最外包层部分或者第二外包层部分106B的粘度相比于第一外包层部分106A更高,导致了出乎意料的优势,即,这导致光纤100的纤芯102内传输的光衰减的降低。包层部分106B的粘度与第一外包层部分106A的粘度差异可以通过第一外包层部分106A的软化点与最外包覆层(例如,第二外包层部分106B)的软化点的差异进行评估。应理解的是,第一和第二外包层部分106A和106B的软化点 $T_{\text{软化}}$ 是玻璃组合物的粘度为 $10^{7.6}$ 泊的温度。在一些实施方式中,包层部分106A和106B的软化点差异可以大于或等于约2°C。在一些实施方式中,外包层部分106A和106B的软化点差异可以大于或等于约3°C且小于100°C。在一些实施方式中,外包层部分106A和106B的软化点差异可以大于或等于约7°C且小于100°C。

[0094] 在一些实施方式中,第二外包层部分106B(在1650°C)的粘度减去第一外包层部分106A(在1650°C)的粘度 $\geq 0.1e^7$ 泊。在一些实施方式中,第二外包层部分106B(在1650°C)的粘度减去第一外包层部分106A(在1650°C)的粘度 $\geq 0.2e^7$ 泊。在一些实施方式中,第二外包层部分106B(在1650°C)的粘度减去第一外包层部分106A(在1650°C)的粘度 $\geq 0.5e^7$ 泊。在一些实施方式中,第二外包层部分106B(在1650°C)的粘度减去第一外包层部分106A(在1650°C)的粘度 $\geq 1e^7$ 泊。在一些实施方式中,第二外包层部分106B(在1650°C)的粘度减去第一外包层部分106A(在1650°C)的粘度 $\geq 1e^8$ 泊。在一些实施方式中,第二外包层部分106B(在1650°C)的粘度减去第一外包层部分106A(在1650°C)的粘度 $\geq 0.1e^7$ 泊且 $\leq 1.6e^8$ 泊。在一些实施方式中,第二外包层部分106B(在1650°C)的粘度减去第一外包层部分106A(在1650°C)的粘度 $\geq 0.1e^7$ 泊且 $\leq 1e^7$ 泊。注意的是,本文使用科学计数法,例如, $1e^7$ 对应 1×10^7 (即,10,000,000)。

[0095] 在一些实施方式中,外包层106的第二部分或第二层(即,第二外包层部分106B)包含的氯少于第一外包层部分106A。在一些实施方式中,第一外包层部分106A中的氯浓度至少比第二外包层部分106B中的氯浓度高1000ppm,以重量计。在一些实施方式中,第一外包层部分106A中的氯浓度至少比第二外包层部分106B中的氯浓度高2000ppm,以重量计。在一些实施方式中,第一外包层部分106A中的氯浓度至少比第二外包层部分106B中的氯浓度高4000ppm,以重量计。在一些实施方式中,第一外包层部分106A中的氯浓度至少比第二外包层部分106B中的氯浓度高10,000ppm,以重量计。根据一些实施方式,包层106的第一外包层部分106A的平均氯浓度是2000-20000ppm,以重量计。根据一些实施方式,包层106的第二外包层部分106B的氯浓度是0-6000ppm,以重量计。在一些实施方式中,外包层的第二外包层部分106B的径向厚度(r_3-r_{3A})大于或等于约2微米且小于或等于约25微米。

[0096] 优选地,光纤100具有标准化应力减轻参数 Φ , $\Phi \geq 5$ 。在一些实施方式中, $100 \geq \Phi \geq 5$ 。在一些实施方式中, $\Phi \geq 12$ 。在一些实施方式中, $\Phi \geq 20$ 。在一些实施方式中, $100 \geq \Phi \geq 12$ 。

[0097] 在一些实施方式中,单模光纤100在1550nm波长处的衰减小于或等于约0.185dB/km,例如在1550nm处为0.17-0.173dB/km。根据一些实施方式,第外包层的第二外包层部分(应力减轻部分)106B处于拉伸,以及该第二外包层部分106B具有大于0.3MPa的轴向应力AS。在一些实施方式中,轴向应力大于1MPa。在一些实施方式中,第二外包层部分106B处于拉伸,并且轴向应力大于2MPa(例如,2-10MPa)。

[0098] 如上文所述,根据一些实施方式,纤芯102、内包层104和外包层106的相对折射率满足如下关系式: $\Delta_{1\text{最大值}} > \Delta_{3A} > \Delta_2$ 。

[0099] 本文所揭示的光纤实施方式具有减小的衰减。例如,光纤100在1550nm波长处的衰减可以小于或等于0.185dB/km。在一些实施方式中,光纤在1550nm波长处的衰减可以小于或等于0.18dB/km,例如在1550nm波长处的衰减可以小于或等于0.175dB/km。此外,光纤100在1310nm波长处的衰减可以小于或等于0.325dB/km,例如在1310nm波长处的衰减可以小于或等于0.32dB/km。本文所揭示的光纤设计的光纤实施方式导致光纤具有如下光学性质:符合G.652 (ITU-T标准),1310nm处的MFD大于或等于约8.2微米至小于或等于约9.5微米,例如1310nm处大于或等于约9.0至小于或等于9.4微米,零色散波长 λ_0 为 $1300 \leq \lambda_0 \leq 1324\text{nm}$,以及光缆截止小于或等于约1260nm。除此之外,本文所揭示的光纤设计的示例性实施方式导致光纤具有如下光学性质:符合G.652 (ITU-T标准),并且例如,可以展现出小于1530nm(例如小于1500nm)的光缆截止。G.654应用光纤可以构造成在1550nm处具有小于或等于22ps/nm/km的色散。

[0100] 在一些实施方式中,光纤100可以是大有效面积光纤。例如,光纤100在1550nm波长时的有效面积可以大于或等于约70微米²,例如,在1550nm波长时大于或等于约80微米²。光纤100在1550nm波长时的有效面积可以大于或等于约90微米²,例如,在1550nm波长时大于或等于约100微米²。光纤100在1550nm波长时的有效面积可以小于或等于约145微米²,例如,在1550nm波长时小于或等于约135微米²。

[0101] 光纤100在1550nm波长时的有效面积可以小于或等于约125微米²,例如,在1550nm波长时小于或等于约155微米²。因此,在一些实施方式中,光纤100的有效面积可以大于或等于约70微米²至小于或等于约145微米²,例如大于或等于约80微米²至小于或等于约135微米²。光纤100的有效面积可以大于或等于约90微米²至小于或等于约125微米²,例如至少100微米²至不超过约115微米²。

[0102] 根据一些实施方式,光纤100的纤芯102、内包层104和外包层106可以通过外部气相沉积(OVD)工艺形成。OVD工艺是通过所需的气相成分(包括二氧化硅和其他所需的正掺杂剂前体)通过 $\text{CH}_4 + \text{O}_2$ 火焰中的水解过程以形成 SiO_2 或掺杂的 SiO_2 烟炱颗粒(例如,直径约为2nm至5微米,以及在一些实施方式中,直径约为50-500nm)的反应,来制造光纤的一种方式。然后,通过热迁移过程在钨棒(用于制造芯烟炱预成形件)或者玻璃芯棒或杆(用于制造烟炱预成形件)上收集烟炱颗粒。然后在高温炉中(在将钨棒从芯预成形件中取出之后)对烟炱预成形件进行干燥和致密化,形成实心的透明玻璃,该工艺通常被称作固结,形成最终光纤预成形件204。所需的芯和包层组成是通过在烟炱预成形件制造工艺中各层使用不同

量的各种气相组分而获得的,例如通过如下方法。

[0103] 芯预成形件:如本文所揭示的一些实施方式所需的那样,纤芯102可以是经过正掺杂的二氧化硅玻璃(例如,GeO₂掺杂的二氧化硅玻璃)。可以用来制造与本文所揭示的实施方式的纤芯102相关的烟盒预成形件的的气相前体材料是例如SiCl₄、GeCl₄、AlCl₃、TiCl₄或POCl₃。烟盒预成形件的该正掺杂部分(正掺杂SiO₂烟盒)放入炉中,干燥(例如,在包含氯气的气氛中),然后将正掺杂SiO₂烟盒固结成芯预成形件102'(本文也称作芯玻璃预成形件或者不含空穴玻璃芯预成形件)。然后,任选地将经过固结的芯预成形件102'放在约为800-1200°C的空气吹扫、氮气吹扫或者氩气吹扫的炉中并加热,除去玻璃中溶解的氢气,然后任选地放入另一个炉中并再拉制成一个芯杆102"或者多个芯杆(也称作芯杆102.01"、102.2"、102.3"等)。

[0104] 芯/内包层杆:将纯SiO₂的烟盒沉积到芯预成形件102'或芯杆102"上,以形成具有内实心玻璃芯杆的烟盒/芯杆预成形件组件。(因此,芯杆102"形成最终预成形件204的芯102_P)。然后可以将该烟盒/芯杆组件放入炉中,干燥,以及然后固结成完全致密的玻璃预成形件104'。然后,任选地将经固结的预成形件104'放在约为800-1200°C的空气吹扫、氮气吹扫或者氩气吹扫的炉中并加热,除去玻璃中溶解的氢气,然后任选地放入另一个炉中并再拉制成一个或多个杆104"(其具有GeO₂掺杂的芯102_P,被二氧化硅内包层104_P围绕,本文也称作层104_P)。

[0105] 芯/内包层/第一外包层部分杆:将纯SiO₂的烟盒沉积到芯-内包层预成形件上或者沉积到芯-内包层杆104'上,以形成具有内实心玻璃芯-内包层杆的烟盒预成形件,即,形成另一烟盒/杆组件。然后将该烟盒/杆组件放入炉中,干燥并用氯掺杂(例如,使用诸如SiCl₄或Cl₂之类的掺杂剂前体),然后固结成完全致密玻璃,从而致密的Cl掺杂烟盒形成所得到的固结的芯/内包层/第一外包层部分组件106A'的外包层的第一部分,具有预成形件的第一外包层部分106A_P。

[0106] 芯-内包层-第二外包层杆:然后将纯SiO₂或者SiO₂加上SiON的烟盒沉积到玻璃预成形件上(即,沉积到固结的芯/内包层/第一外包层部分组件106A'上),形成烟盒/杆组件,其在玻璃杆上具有烟盒层,包括芯-内包层-外包层组件的第一部分。然后将该烟盒/杆组件放在炉中,干燥,任选地用SiON掺杂,然后固结成完全致密玻璃,以形成具有外包层部分106B_P的最终光纤预成形件。在该示例性实施方式中,最终预成形件204包括:具有GeO₂掺杂的二氧化硅纤芯102_P;二氧化硅内包层104_P; (外包层的) 第一外包层部分106A_P,其包括用氯正掺杂的二氧化硅(最终预成形件的该部分对应光纤的第一外包层部分106A);以及第二外包层部分106B_P,其包括未掺杂的SiO₂或者SiNO掺杂的二氧化硅(最终预成形件的该部分对应光纤的第二外包层部分106B)。然后,任选地将具有固结外层106B_P的固结最终预成形件204放在约为800-1200°C的空气吹扫、氮气吹扫或者氩气吹扫的炉中并加热,除去玻璃中溶解的氢气。然后从最终预成形件204拉制光纤,以及用例如标准第一和第二氨基甲酸酯丙烯酸酯涂层涂覆拉制的光纤。

[0107] 现参见图3,显示用于生产光纤的系统200的一个实施方式。系统200可以包括用于加热光纤预成形件204的拉制炉202,从而可以从光纤预成形件204拉制光纤100。可以通过OVD方法生产预成形件204,其具有上文所述的组成和结构。拉制炉202的取向可以使得从光纤预成形件204拉制的光纤100以沿着基本垂直路径离开炉。

[0108] 在光纤100离开控制炉202之后,可以采用非接触式传感器206a、206b来测量光纤100的直径和施加到光纤100的控制张力。可以通过任意合适的张力施加机制210向光纤施加张力。如图3所示,在测量了光纤100的直径和张力之后,可以使得光纤100通过冷却机制208,其提供了光纤100的缓慢冷却。冷却机制208可以是本领域现在就已知的或者后续开发的用于对光纤进行冷却的任意机制。在一个实施方式中,冷却机制208填充了气体,该气体有助于使得光纤100以比光纤100在环境温度下的空气中的冷却更为缓慢的速率进行冷却。

[0109] 在一些实施方式中,冷却机制208可以使得拉制的光纤以小于或等于约5000°C/s(例如,小于或等于约4750°C/s)的冷却速率,从约为1600°C的温度冷却到约为1250°C的温度。在一些实施方式中,冷却机制208可以使得拉制的光纤以小于或等于约4500°C/s(例如,小于或等于约4250°C/s)的冷却速率,从约为1600°C的温度冷却到约为1250°C的温度。在一些实施方式中,冷却机制208可以使得拉制的光纤以小于或等于约12000°C/s(例如,小于或等于约11500°C/s)的冷却速率,从约为1250°C的温度冷却到约为1050°C的温度。冷却机制208可以使得拉制的光纤以小于或等于约11000°C/s(例如,小于或等于约10500°C/s)的冷却速率,从约为1250°C的温度冷却到约为1050°C的温度。在一些实施方式中,冷却机制208使得拉制的光纤以小于或等于约4500°C/s(例如,小于或等于约4250°C/s)的冷却速率,从约为1400°C的温度冷却到约为1050°C的温度。在一些实施方式中,冷却机制208可以使得拉制的光纤以小于或等于约12000°C/s(例如,小于或等于约11500°C/s)的冷却速率,从约为1050°C的温度冷却到约为850°C的温度。冷却机制208可以使得拉制的光纤以小于或等于约11000°C/s(例如,小于或等于约10500°C/s)的冷却速率,从约为1050°C的温度冷却到约为850°C的温度。

[0110] 在本文所述的实施方式中,施加张力的机制210可以向光纤100施加20gf至400gf(gf指的是克作用力)的张力,例如,小于或等于200gf或者小于或等于150gf(例如,30-150gf)。

[0111] 根据一些实施方式,拉制光纤100的方法包括如下步骤:(i)提供光纤预成形件204,其包含:(a)纤芯102_P,其包含二氧化硅和小于或等于约11重量%的氧化锆以及具有最大相对折射率 $\Delta_{1\text{最大值}}$;(b)内包层104_P,其围绕纤芯102_P且具有最小相对折射率 Δ_2 ,其中, $\Delta_{1\text{最大值}} > \Delta_2$;(c)外包层106_P,其围绕内包层且包含第一外包层部分106A_P和围绕了第一外包层部分106A_P的第二外包层部分106B_P;以及第二外包层部分的玻璃软化点与第一外包层部分的玻璃软化点之间的差异至少为2°C;以及(ii)从该预成形件204拉制光纤100。根据本文所述的实施方式,在拉制过程中,光纤的张力优选大于20gf且小于400gf,以及更优选地,大于30gf且不大于约300gf。

[0112] 根据一些实施方式,拉制光纤的方法包括如下步骤:(i)提供光纤预成形件204,其包含:(a)纤芯102_P,其包含二氧化硅和小于或等于约11重量%的氧化锆以及具有最大相对折射率 $\Delta_{1\text{最大值}}$;(b)内包层102_P,其围绕纤芯102_P且具有最小相对折射率 Δ_2 ,其中, $\Delta_{1\text{最大值}} > \Delta_2$;(c)外包层106_P,其围绕内包层且包含第一外包层部分106A_P和围绕了第一外包层部分106A_P的第二外包层部分106B_P;以及其中,第二外包层部分(在1650°C)的粘度减去第一外包层部分(在1650°C)的粘度是 $\geq 0.1e^7$ 泊C(例如, $\geq 0.5e^7$ 泊,或者约为 $0.1e^7$ 泊至约为 $1.6e^8$ 泊);以及(ii)从预成形件204拉制光纤100。根据本文所述的实施方式,在拉制过程中,光纤的张力优选大于20gf且小于400gf,以及更优选地,大于30gf且不大于约300gf。

[0113] 根据一些实施方式,制造用于本文所述的光纤100的光纤预成形件204的方法包括如下步骤:(i)提供玻璃芯杆102”;(ii)在芯杆上气相沉积第一烟炱层,其中,第一烟炱层包含径向厚度至少为1cm且具有第一烟炱表面积的二氧化硅烟炱;(iii)在第一烟炱层上气相沉积第二烟炱层,其中,第二烟炱层包含径向厚度至少为1cm且具有第二烟炱表面积的二氧化硅烟炱,其中,第二烟炱表面积小于第一烟炱表面积;(iv)用含氯化合物对沉积的第一和第二烟炱层进行掺杂;(v)对经过掺杂的第一和第二烟炱层进行烧结,从而形成经掺杂的预成形件,其具有纤芯102_p和至少两层围绕纤芯102_p的玻璃层,在第一层中,氯掺杂剂的浓度相比于第二层中的氯掺杂剂浓度更高。在一些实施方式中,第一烟炱表面积 $>12\text{m}^2/\text{g}$,在一些实施方式中, $>15\text{m}^2/\text{g}$,以及在一些实施方式中, $>20\text{m}^2/\text{g}$ 。在一些实施方式中,第二烟炱表面积 $<10\text{m}^2/\text{g}$,在一些实施方式中, $<5\text{m}^2/\text{g}$,在一些实施方式中, $<2\text{m}^2/\text{g}$,以及在一些实施方式中, $<0.5\text{m}^2/\text{g}$ 。在一些实施方式中,第一层的氯浓度为2000–20000ppm,以重量计;以及第二层的氯浓度为0–6000ppm,以重量计。根据一些实施方式,将该预成形件204用于拉制本文所述的光纤100,以及在拉制过程中光纤的张力大于20gf且小于400gf,例如,大于30gf且不大于约300gf。至少在一些实施方式中,第二层对应光纤100的第二外包层部分106B,以及预成形件的第一层对应第一外包层部分106A。

[0114] 根据一些实施方式,制造光纤预成形件204的方法包括如下步骤:

[0115] (i)提供玻璃芯杆102”;

[0116] (ii)在芯杆102”上沉积烟炱层,从而在芯杆上产生烟炱层SL,其中,烟炱层包含径向厚度至少为2cm且具有第一烟炱表面积的二氧化硅烟炱;

[0117] (iii)从外部加热烟炱层,从而在整个烟炱层SL的径向较外10%部分上产生较低的烟炱平均表面积,这是相比于整个烟炱层SL的径向最内10%部分上的烟炱层平均表面积而言;

[0118] (iv)用含氯化合物掺杂沉积的烟炱;以及

[0119] (v)对掺杂的烟炱层进行烧结,从而形成经掺杂的预成形件,其具有芯杆以及在整个烟炱层的径向较内10%部分中的氯掺杂剂浓度低于整个烟炱层的径向较外10%部分中的氯掺杂剂浓度。在一些实施方式中,整个烟炱层的径向较内10%部分的烟炱表面积 $>12\text{m}^2/\text{g}$,在一些实施方式中, $>15\text{m}^2/\text{g}$,以及在一些实施方式中, $>20\text{m}^2/\text{g}$ 。在一些实施方式中,整个烟炱层的径向较外10%部分的烟炱表面积 $<10\text{m}^2/\text{g}$,在一些实施方式中, $<5\text{m}^2/\text{g}$,在一些实施方式中, $<2\text{m}^2/\text{g}$,以及在一些实施方式中, $<0.5\text{m}^2/\text{g}$ 。在一些实施方式中,第一层的氯浓度为2000–20000ppm,以重量计;以及第二层的氯浓度为0–6000ppm,以重量计。至少在一些实施方式中,经掺杂的(具有较高氯量)的预成形件的整个烟炱层的径向较内10%部分(即,具有较高氯量的部分)至少对应预成形件204的一部分的第一外包层部分106A_p,以及至少对应光纤100的一部分的第一外包层部分106A。在至少一些实施方式中,预成形件的整个烟炱层的径向较外10%部分(即,具有较低氯量的部分)对应光纤100的第二外包层部分106B和预成形件204的外包层部分106B_p。根据一些实施方式,将该预成形件用于拉制本文所述的光纤100,以及在拉制过程中单模光纤的张力是20–400gf,例如,大于30gf且不大于约300gf。

[0120] 根据一些实施方式,制造光纤预成形件204的方法包括如下步骤:

[0121] (i)提供心轴;

[0122] (ii) 在心轴上气相沉积第一层,其中,第一层包含径向厚度至少为1cm且具有第一烟炱表面积的二氧化硅烟炱;

[0123] (iii) 在第一层上气相沉积第二层,其中,第二层包含径向厚度至少为1cm且具有第二烟炱表面积的二氧化硅烟炱,其中,第二烟炱表面积小于第一烟炱表面积;

[0124] (iv) 移除心轴;

[0125] (v) 用含氯化物掺杂沉积的烟炱;

[0126] (vi) 烧结经掺杂的烟炱层,从而形成经掺杂的预成形件,其在第一层中的氯掺杂剂浓度高于第二层中的氯掺杂剂浓度。

[0127] 实施例

[0128] 通过以下的实施例对实施方式做进一步阐述。

[0129] 表1A至1F揭示了光纤100的实施方式的建模实施例(光纤实施例1-14),所述光纤100包括:氧化锗掺杂的二氧化硅纤芯102,未掺杂或者掺杂的二氧化硅内包层104,经掺杂的二氧化硅第一外包层部分106A,以及未掺杂或者掺杂的二氧化硅第二外包层部分106B。这些层(即,纤芯102、内包层104、第一和第二外包层部分106A、106B)中的掺杂剂分别还可包含 GeO_2 、Cl、F和N,如所示。光纤100的光纤实施例1-14具有外包层106,所述外包层106具有应力减轻层。也就是说,这些光纤的第二外包层106B是应力减轻层。表1A-1F还提供不具有应力减轻的第二外包层的光纤比较例1-3的数据。

[0130] 表1A至1F显示:(a) 光纤100的纤芯102、内包层104、第一外包层部分106A和第二外包层部分106B中存在的掺杂剂的重量%(余下是二氧化硅),(b) 每层的相对折射率 Δ , (c) 每层的外半径,单位微米,(d) 软化点,单位 $^{\circ}\text{C}$,每层在 1650°C 的粘度,(e) 每层光纤层(在 1650°C)的粘度乘以该层的面积,单位泊 \cdot 微米 2 ;以及(f) 标准化的应力减轻参数, Φ 。更具体来说,表1A揭示了纤芯参数。表1B揭示了与内包层104相关的参数。表1C揭示了与第一包层部分106A相关的参数。表1D揭示了与第二包层部分106B相关的参数。此外,表1E提供了第二外包层106B在 1650°C 的粘度乘以第二外包层的面积的数据(该层在本文也被称作应力减轻层),该层的标准的粘度乘以面积,以及标准的应力减轻参数 Φ 。表1F揭示了分别以50g和150g拉制张力拉制的光纤100实施方式的纤芯102、内包层104以及第一和第二外包层(即,外包层106的106A部分和106B部分)中的建模轴向应力。

[0131] 更具体来说,光纤实施例1-14是具有应力减轻第二外包层106B的光纤100的示例性实施方式。表1A-1F还显示了不具有应力减轻第二外包层106B的比较例光纤1-3。

[0132] 本文所揭示的一些光纤实施方式可以包含:芯102中5-10重量%氧化锗(例如,表1A中7-10重量%氧化锗)和0-0.1重量%Cl(表1A所示的实施方式中,0.1重量%);3.5-8微米的纤芯半径(参见例如表1A);0.25-0.55%的纤芯 Δ (表1A所示的实施方式中,0.26-0.51%);13-20微米的内包层半径 r_1 (例如,表1B中13微米);40-55微米的第一外包层半径 r_{3A} (例如,表1C所示的实施方式中,40至55或者55微米);以及60-65微米的第二外包层半径 r_3 (例如,表1D所示的实施方式中,62.5微米)。在一些实施方式中,第一外包层106A包含0.2-1.5重量%氯(例如,表1C所示的实施方式中,0.4-1.5%)。第二外包层106B包含0-0.2重量%的Cl和/或N(例如,参见表1D所示的实施方式)。

[0133] 表1A-1F所示的比较例1-3仅具有外半径为62.5微米的一层外包层,没有第二外包层(因此,出于方便目的,在这些表格中,第一外包层,即第一外包层延伸到比较例光纤的最

外边缘)。这些比较例光纤1-3在外包层中具有恒定(均匀)的掺杂剂浓度。

[0134] 对于表1A-1F的示例性光纤实施方式的实施方式,纤芯102、内包层104、第一外包层106A和第二外包层106B的软化点分别是1600°C至1650°C、1650°C至1700°C、1650°C至1700°C、以及1650°C至1770°C。第二外包层部分106B(在1650°C)的粘度(单位,泊)减去第一外包层部分106A的粘度是 $0.1e^7$ 至 $1.6e^8$ 。纤芯、内包层、第一外包层和第二外包层(在1650°C)的粘度分别是 2×10^7 至 4×10^7 、 5×10^7 至 6×10^7 、 4×10^7 至 5.5×10^7 、以及 5×10^7 至 3×10^8 。对于每一层光纤层,每层(在1650°C)的粘度乘以该层的面积(单位,泊微米²)分别是: 1×10^9 至 8×10^9 (纤芯)、 2×10^{10} 至 3×10^{10} (内包层)、 1×10^{11} 至 8×10^{11} (第一外包层)和 1×10^{11} 至 8×10^{12} (第二外包层)。实施例1-14的光学实施方式的标准化应力减轻参数 Φ 是5-300。

[0135] 相反地,比较例1-3的光纤的标准化应力减轻参数 Φ 是0。因此,根据本发明的实施方式的光纤100的光纤衰减低于比较例光纤,因为它们具有外应力减轻层106B,因而显示出对于这些光纤的纤芯和内包层的明显应力减轻。比较例光纤不具有应力减轻层106B,它们也不显示出该益处。

[0136] 表1A-1F揭示了实施例1-14的光纤实施方式的如下参数:纤芯、内包层、第一外包层部分和第二外包层部分(或层)的掺杂剂(GeO₂、Cl、F和SiO_N)重量%;纤芯、内包层、第一外包层部分和第二外包层部分的外半径;(相对于纯的未掺杂二氧化硅的)相对折射率;纤芯、内包层、第一外包层部分和第二外包层部分的软化点;每层在1650°C的粘度、粘度乘以面积;标准化粘度乘以面积 Ω ;标准化的应力减轻面积 Ψ ;以及标准化应力减轻参数 Φ 。还显示了表1A-1F中的三个比较例光纤(比较例1、2和3)。这些比较例光纤具有均匀的外包层,即它们仅具有到达光纤的外边缘的第一外包层(它们不具有第二外包层,因而对于比较例光纤,在表格中与第二外包层部分相关的参数表示为“na”,指的是不适用)。对于实施例1-14的光纤实施方式,这些表格中显示的轴向压缩是对于第一外包层而言。对于三个比较例光纤,第一外包层构成了整个外包层。

[0137] 分析结果显示,本文所揭示的示例性光纤实施方式的光纤(实施例1-14光纤)的应力减轻参数 $\Phi \geq 5$,这对应应当光纤以50g拉制张力拉制时具有轴向应力 ≥ 0.3 MPa的轴向拉伸以及当光纤以150g拉制张力拉制时具有轴向应力 ≥ 1 MPa的轴向拉伸的第二外包层(第二外包层部分106B)(即,分别为50gf和150gf)。因此, $\Phi \geq 5$ 的第二外包层部分106B实现了上文所述的较低光纤衰减。结果还显示,具有应力减轻外层(第二外包层部分106B)的光纤实施方式的软化点差异(第二外包层的 $T_{\text{软化}}$ 减去第一外包层的 $T_{\text{软化}}$) $\geq 2^\circ\text{C}$ (在一些实施方式中 $\geq 3^\circ\text{C}$,以及在一些实施方式中 $\geq 7^\circ\text{C}$)。比较例光纤不具有应力减轻外包层,以及在外包层的较外部分中也不具有相比于外包层的较内部分的玻璃具有更低软化点的玻璃。

[0138] 表1A

实施例	纤芯, GeO ₂ , 重量 %	纤芯, 氯, 重量 %	纤芯, 氟, 重量 %	纤芯 折射率, %	纤芯半 径 R1, 微米	纤芯软 化点, °C	纤芯(在 1650°C) 的粘 度, 泊	纤芯 (在 1650°C) 的 粘度乘以 纤芯面积, 泊·微米 ²	
[0139]	1	7	0.1	0	0.36	4	1634.9	3.1E+07	1.6E+09
	2	7	0.1	0	0.36	4	1634.9	3.1E+07	1.6E+09
	3	7	0.1	0	0.36	4	1634.9	3.1E+07	1.6E+09
	4	8	0.1	0	0.41	6	1630.5	2.9E+07	3.3E+09
	5	5	0.1	0	0.26	8	1643.8	3.6E+07	7.2E+09
	6	7	0.1	0	0.36	4	1634.9	3.1E+07	1.6E+09
	7	7	0.1	0	0.36	4	1634.9	3.1E+07	1.6E+09
	8	7	0.0	0	0.35	4	1635.7	3.1E+07	1.6E+09
	9	9	0.1	0	0.46	3.5	1626.1	2.7E+07	1.0E+09
	10	7	0.1	0	0.36	4	1634.9	3.1E+07	1.6E+09
	11	7	0.1	0	0.36	4	1634.9	3.1E+07	1.6E+09
	12	7	0.1	0	0.36	4	1634.9	3.1E+07	1.6E+09
	13	10	0.1	0	0.51	4	1621.8	2.5E+07	1.3E+09
[0140]	14	10	0.1	0	0.51	4	1621.8	2.5E+07	1.3E+09
	比较例 1	7	0.1	0	0.36	4	1634.9	3.1E+07	1.6E+09
	比较例 2	7	0.1	0	0.36	4	1634.9	3.1E+07	1.6E+09
	比较例 3	10	0.1	0	0.51	4	1621.8	2.5E+07	1.3E+09
[0141]	表1B								

实施例	内包层, GeO ₂ , 重量%	内包层, 氟, 重量%	内包层, 氟, 重量%	内包层折射率, %	内包层半径 R2, 微米	内包层软化点, °C	内包层 (在 1650°C) 的粘度, 泊	内包层 (在 1650°C) 的粘度乘以内包层面积, 泊·微米 ²
1	0	0.1	0	0.01	13	1666.3	5.2E+07	2.5E+10
2	0	0.1	0	0.01	13	1666.3	5.2E+07	2.5E+10
3	0	0.1	0	0.01	13	1666.3	5.2E+07	2.5E+10
4	0	0.1	0	0.01	13	1666.3	5.2E+07	2.2E+10
5	0	0.1	0	0.01	20	1666.3	5.2E+07	5.5E+10
[0142] 6	0	0.1	0	0.01	13	1666.3	5.2E+07	2.5E+10
7	0	0.1	0	0.01	13	1666.3	5.2E+07	2.5E+10
8	0	0.1	0	0.01	13	1666.3	5.2E+07	2.5E+10
9	0	0.1	0	0.01	13	1666.3	5.2E+07	2.6E+10
10	0	0.1	0	0.01	13	1666.3	5.2E+07	2.5E+10
11	0	0.1	0	0.01	13	1666.3	5.2E+07	2.5E+10
12	0	0.1	0	0.01	13	1666.3	5.2E+07	2.5E+10
13	0	0.1	0	0.01	13	1666.3	5.2E+07	2.5E+10
14	0	0.1	0	0.01	13	1666.3	5.2E+07	2.5E+10
比较例 1	0	0.1	0	0.01	13	1666.3	5.2E+07	2.5E+10
比较例 2	0	0.1	0	0.01	13	1666.3	5.2E+07	2.5E+10
比较例 3	0	0.1	0	0.01	13	1666.3	5.2E+07	2.5E+10
[0143] 表1C								

实施例	第一外包层部分, GeO ₂ , 重量%	第一外包层部分, 氟, 重量%	第一外包层部分, 氟, 重量%	第一外包层部分折射率, %	第一外包层部分半径 R3A, 微米	第一外包层部分软化点, °C	第一外部层部分 (在 1650°C) 的粘度, 泊	第一外部层部分 (在 1650°C) 的粘度乘以面积, 泊·微米 ²
[0144] 1	0	0.4	0	0.04	40	1663.8	5.0E+07	2.2E+11
2	0	0.4	0	0.04	50	1663.8	5.0E+07	3.6E+11
3	0	0.4	0	0.04	55	1663.8	5.0E+07	4.5E+11
4	0	0.4	0	0.04	40	1663.8	5.0E+07	2.2E+11
5	0	0.4	0	0.04	40	1663.8	5.0E+07	1.9E+11
6	0	0.4	0	0.04	40	1663.8	5.0E+07	2.2E+11
7	0	0.8	0	0.08	40	1660.5	4.7E+07	2.1E+11
8	0	0.4	0	0.04	40	1663.8	5.0E+07	2.2E+11
9	0	0.4	0	0.04	50	1663.8	5.0E+07	3.6E+11
10	0	0.4	0	0.04	40	1663.8	5.0E+07	2.2E+11
11	0	0.4	0	0.04	40	1663.8	5.0E+07	2.2E+11
12	0	0.8	0	0.08	50	1660.5	4.7E+07	3.5E+11
13	0	1.5	0	0.15	40	1654.8	4.3E+07	1.9E+11
14	0	1.5	0	0.15	50	1654.8	4.3E+07	3.2E+11
比较例 1	0	0.4	0	0.04	62.5	1663.8	5.0E+07	5.9E+11
比较例 2	0	0.1	0	0.01	62.5	1666.3	5.2E+07	6.1E+11
比较例 3	0	0.4	0	0.04	62.5	1663.8	5.0E+07	5.9E+11
[0145] 表1D								
实施例	第二外包层部分, GeO ₂ , 重量%	第二外包层部分, 氟, 重量%	第二外包层部分, 氟, 重量%	第二外包层部分, 氮 (N), 重量%	第二外包层部分折射率, %	第二外包层部分半径 R3, 微米	第二外包层部分软化点, °C	第二外部层部分 (在 1650°C) 的粘度, 泊
[0146] 1	0	0	0	0	0	62.5	1667.1	5.3E+07
2	0	0	0	0	0	62.5	1667.1	5.3E+07
3	0	0	0	0	0	62.5	1667.1	5.3E+07
4	0	0	0	0	0	62.5	1667.1	5.3E+07
5	0	0	0	0	0	62.5	1667.1	5.3E+07
6	0	0	0	0.2	0.2	62.5	1757.5	2.1E+08

	7	0	0	0	0	0	62.5	1667.1	5.3E+07
	8	0	0	0	0	0	62.5	1667.1	5.3E+07
	9	0	0	0	0	0	62.5	1667.1	5.3E+07
	10	0	0.1	0	0	0.01	62.5	1666.3	5.2E+07
	11	0	0.2	0	0	0.02	62.5	1665.5	5.1E+07
[0147]	12	0	0.2	0	0	0.02	62.5	1665.5	5.1E+07
	13	0	0.2	0	0	0.02	62.5	1665.5	5.1E+07
	14	0	0.2	0	0	0.02	62.5	1665.5	5.1E+07
	比较例 1	na	na	na	na	na	na	na	na
	比较例 2	na	na	na	na	na	na	na	na
	比较例 3	na	na	na	na	na	na	na	na
[0148]	表1E								
	实施例	第二外部层部分（在 1650°C）的粘度乘以面积，泊·微米 ²	第二外包层部分的软化点（T _{软化} ）减去第一外包层部分的软化点（T _{软化} ），°C	第二外包层部分（在 1650°C）的粘度减去第一外包层部分（在 1650°C）的粘度，泊	标准化粘度乘以面积，Ω	应力减轻层的标准化面积，Ψ	标准化的应力减轻参数，Φ		
	1	3.8E+11	3.3	2.7.E+06	6.0E-01	5.9E-01	12.8		
	2	2.3E+11	3.3	2.7.E+06	3.7E-01	3.6E-01	12.4		
[0149]	3	1.5E+11	3.3	2.7.E+06	2.4E-01	2.3E-01	9.5		
	4	3.8E+11	3.3	2.7.E+06	6.0E-01	5.9E-01	14.3		
	5	3.8E+11	3.3	2.7.E+06	6.0E-01	5.9E-01	13.5		
	6	1.5E+12	93.7	1.6.E+08	8.6E-01	5.9E-01	268.9		
	7	3.8E+11	6.6	5.3.E+06	6.1E-01	5.9E-01	24.2		
	8	3.8E+11	3.3	2.7.E+06	6.0E-01	5.9E-01	12.8		
	9	2.3E+11	3.3	2.7.E+06	3.7E-01	3.6E-01	12.3		
	10	3.8E+11	2.5	2.0.E+06	6.0E-01	5.9E-01	9.6		
	11	3.7E+11	1.7	1.3.E+06	6.0E-01	5.9E-01	6.4		

	12	2.3E+11	5.0	3.9.E+06	3.8E-01	3.6E-01	17.8
	13	3.7E+11	10.7	8.2.E+06	6.3E-01	5.9E-01	37.7
	14	2.3E+11	10.7	8.2.E+06	4.0E-01	3.6E-01	38.5
[0150]	比较例 1	na	0.0	0.0.E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0
	比较例 2	na	0.0	0.0.E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0
	比较例 3	na	0.0	0.0.E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0
[0151]	表1F						

实施例	纤芯轴向应力 (50 g 张力控制), MPa	内包层轴向应力 (50 g 张力控制), MPa	第一外包层部分轴向应力 (50 g 张力控制), MPa	第二外包层部分轴向应力 (50 g 张力控制), MPa	纤芯轴向应力 (150 g 张力控制), MPa	内包层轴向应力 (150 g 张力控制), MPa	第一外包层部分轴向应力 (150 g 张力控制), MPa	第二外包层部分轴向应力 (150 g 张力控制), MPa
1	24	0.2	-1.4	0.7	-5.2	0.8	-3.9	2.4
2	25	0.7	-0.9	1.2	-4.3	2.3	-2.5	4.0
3	25	1.0	-0.7	1.5	-3.8	3.2	-1.6	4.9
4	28	0.0	-1.6	0.5	-4.5	0.8	-3.9	2.5
5	17	-0.1	-1.7	0.4	-5.9	0.6	-4.2	2.2
6	9	-25.6	-26.2	18.0	-51.2	-76.6	-78.2	54.3
7	25	0.9	-2.8	1.5	-3.9	3.1	-7.9	4.7
8	25	0.2	-1.4	0.7	-4.2	0.8	-4.0	2.4
9	32	0.7	-1.0	1.2	-2.6	2.3	-2.5	3.9
10	25	0.5	-1.1	0.5	-4.6	1.8	-3.0	1.8
11	25	0.8	-0.8	0.3	-4.0	2.8	-2.1	1.1
12	25	1.6	-2.1	1.0	-2.6	5.1	-6.1	3.5
13	37	2.9	-4.5	2.3	2.0	9.1	-12.9	7.4
14	38	4.6	-3.0	4.0	4.5	14.4	-8.6	12.6
比较例 1	25	1.5	-0.2	na	-2.9	4.7	-0.2	na
比较例 2	24	0.0	0.0	na	-5.7	0.0	0.0	na
比较例 3	37	1.4	-0.2	na	0.1	4.7	-0.2	na

[0153] 光纤制造

[0154] 表1A-1F的实施例1光纤实施方式包括应力减轻第二外包层部分106B。该光纤100的制造如下：将1米长的11mm直径杆材104'放在车床上，所述杆材104'具有氧化锆掺杂的二氧化硅纤芯102P (0.36% Δ vs 二氧化硅，含7.8重量% GeO₂和0.1重量% Cl) 和基于二氧化硅的包覆层104P (含二氧化硅以及0.1重量% Cl，对应光纤100的内包层104)，以及纤芯-包层直径比为0.35。将1780克二氧化硅烟炱 (0.5g/cc) 火焰沉积到该杆材上。芯杆-烟炱组件放入炉中，在包含He和Cl₂的约1100°C气氛中干燥，然后在包含He和SiCl₄的气氛中掺杂，以及通过将预成形件升温至约1500°C在包含He和SiCl₄的气氛中烧结成致密玻璃预成形件 (从而获得不含空穴的玻璃预成形件106A')。得到的该预成形件106A'从炉取出，冷却至室温，放回到车床上，在上面沉积额外的2860克烟炱。具有外烟炱层的该预成形件放入炉中，在包含He和CO的约为1100°C的气氛中干燥，然后使得预成形件升温至约1500°C在包含He的气氛中烧结成致密玻璃预成形件 (从而获得基本不含空穴的玻璃预成形件204，其具有GeO₂掺杂

的二氧化硅纤芯102_P、基于二氧化硅的内包层104_P、Cl掺杂的二氧化硅第一外包层106A_P和二氧化硅第二外包层106B_P)。预成形件的第二外包覆层对应拉制光纤100的应力减轻层/第二外包层部分106B。预成形件的基于二氧化硅的纤芯102_P含有7.8重量%GeO₂和0.1重量%Cl,基于二氧化硅的内包层104_P含有0.1重量%Cl,第一外包覆层106A_P含有0.8重量%Cl,以及应力减轻第二外包覆层106B_P包含二氧化硅且不含Cl。预成形件204放入氩气吹扫的1000℃保持烘箱中,持续24小时,从预成形件脱去氦气。然后将预成形件204放入拉制炉中,以三种不同张力(分别是50、100和150克张力(即,50gf、100gf和150gf)拉制125微米直径光纤100,5km)并涂覆。更具体来说,经涂覆的光纤100在应力减轻外包覆层106B上包括了双层氨基甲酸酯丙烯酸酯涂层。

[0155] 根据如下制造比较例1(不包括应力减轻包覆层的光纤):

[0156] 将1米长的11mm直径芯杆放在车床上,所述芯杆具有氧化锗掺杂的二氧化硅纤芯(0.36% Δ_{vs} 二氧化硅,含7.8重量%GeO₂和0.1重量%Cl)和二氧化硅包层(含0.1重量%Cl),以及纤芯-包层直径比为0.35。将4640克二氧化硅烟炱(0.5g/cc)火焰沉积到该杆材上。芯杆-烟炱组件放入炉中,在包含He和Cl₂的约1100℃气氛中干燥,然后在包含He和SiCl₄的气氛中掺杂,以及通过将预成形件升温至约1500℃在包含He和SiCl₄的气氛中烧结成致密玻璃预成形件(从而获得芯杆包覆不含空穴的玻璃预成形件),从而获得GeO₂掺杂的二氧化硅纤芯,Cl掺杂的二氧化硅包覆不含空穴玻璃预成形件。该预成形件包括:二氧化硅纤芯(其含有7.8重量%GeO₂和0.1重量%Cl),二氧化硅内包层(其含有0.1重量%Cl),二氧化硅外包层(其含有0.8重量%Cl)(没有应力减轻第二外包覆层)。预成形件放入氩气吹扫的1000℃保持烘箱中,持续24小时,从预成形件脱去氦气。然后将预成形件放入拉制炉中,以三种不同张力(分别是50、100和150克张力拉制125微米直径光纤,5km),以及光纤涂覆双层氨基甲酸酯丙烯酸酯涂层。

[0157] 这两种制造的光纤的参数如表2所示。表2显示具有0.36应力减轻参数 Ψ (Φ 为25.5)的光纤实施方式,其对应处于具有4MPa的轴向应力的轴向张力的第二外包层106B(光纤以50g拉制张力拉制)和处于具有12.6MPa的轴向应力的轴向张力的第二外包层106B(光纤以150g拉制张力拉制),相比于没有此类应力减轻外包覆层的比较例光纤,这通过纤芯和内包层中应力减轻实现了这些光纤中的较低衰减。此外,表2的实施例光纤100具有应力减轻外层106B,其具有6.6℃的软化点差异(第二外包覆层减去第一外包覆层),而没有应力减轻外包覆层的比较例光纤不具有该特征且在整個外包层中具有较低软化点。

[0158] 表2

[0159]

参数	本发明实施例 1	比较例 1
纤芯, GeO ₂ , 重量%	7.8	7.8
纤芯, 氯, 重量%	0.1	0.1
纤芯折射率, % Δ_1 最大值	0.4	0.4
纤芯半径 R1, 微米	4.5	4.5
纤芯软化点, °C	1631.4	1631.4
纤芯 (在 1650°C) 的粘度, 泊	2.9E+07	2.9E+07
纤芯 (在 1650°C) 的粘度乘以纤芯 面积, 泊·微米 ²	1.9E+09	1.9E+09
内包层, 氯, 重量%	0.1	0.1
内包层折射率, % Δ_2	0.01	0.01
内包层半径 r ₂ , 微米	12.7	12.7
内包层软化点, °C	1666.3	1666.3

[0160]

内包层（在 1650°C）的粘度，泊	5.2E+07	5.2E+07
内包层（在 1650°C）的粘度乘以内包层面积，泊·微米 ²	2.3E+10	2.3E+10
第一外包层，氯，重量%	0.8	0.8
第一外包层折射率，%Δ ₃	0.08	0.08
第一外包层部分半径 r _{3A} ，微米	42	62.5
第一外包层部分软化点，°C	1660.5	1660.5
第一外部层部分 106A（在 1650°C）的粘度，泊	4.7E+07	4.7E+07
第一外部层部分（在 1650°C）的粘度乘以面积，泊·微米 ²	2.4E+11	5.6E+11
第二外包层部分，氯，重量%	0.0	na
第二外包层部分折射率，%Δ ₄	0	na
第二外包层部分半径 R ₃ ，微米	62.5	na
第二外包层软化点，°C	1667.1	na
第二外部层部分 106B（在 1650°C）的粘度，泊	5.3E+07	na
软化点差异（第二外包层部分减去第一外包层部分），°C	6.6	0.0
第二外包层（在 1650°C）的粘度乘以面积，泊·微米 ²	3.5E+11	na
标准化粘度乘以面积，Ω	0.40	0.00
应力减轻层 106B 的标准化面积，Ψ	0.36	0.00
标准化的应力减轻参数，Φ	25.5	0.0
纤芯轴向应力（50 g 张力控制），MPa	38	25
内包层轴向应力（50 g 张力控制），MPa	4.6	1.5
第一外包层的轴向应力（50 g 张力控制），MPa	-3.0	-0.2

[0161]	第二外包层的轴向应力 (50 g 张力控制光纤), MPa	4.0	na
	纤芯的轴向应力 (150 g 张力控制), MPa	4.5	-2.9
	内包层的轴向应力 (150 g 张力控制光纤), MPa	14.4	4.7
	第一外包层的轴向应力 (150 g 张力控制光纤), MPa	-8.6	-0.2
	第二外包层的轴向应力 (150 g 张力控制光纤), MPa	12.6	na

[0162] 图4A显示光纤100的不同光纤分布设计(类似于图2A)所示的建模轴向应力,应力减轻层(第二外包层部分106B)从外包覆层106内的不同径向位置 R_{3A} 开始(分别是 $40\mu\text{m}$ 、 $50\mu\text{m}$ 和 $55\mu\text{m}$)。在这些实施方式中,第一外包层部分106A经由C1掺杂二氧化硅正掺杂至 $0.03\% \Delta$ (相对于纯二氧化硅),第二外包层部分106B包括纯二氧化硅,以及光纤以150g张力控制。图4A是根据本发明实施方式以及没有应力减轻层的比较例光纤的三种光纤100,轴向应力参数与径向位置(r)的关系。更具体来说,图4A证实了光纤100的三个实施例,其中,应力减轻层(第二外包层部分106B)处于轴向张力,轴向应力 $\geq 0.3\text{MPa}$ (50g控制张力控制的光纤)以及轴向应力 $\geq 0.3\text{MPa}$ (150g控制张力控制的光纤)。还证实了在具有应力减轻层(第二外包层部分106B)的光纤100中,外包层的第一部分所处的轴向应力明显小于外包层的第二部分,以及所处的轴向应力还明显小于没有应力减轻层的光纤的外包层。在光纤100中包含应力减轻层的该外包层106实现了较低的光纤衰减。

[0163] 可以通过控制烟盒的起始表面积来实现二氧化硅烟盒预成形件的掺杂水平控制。蒸汽相掺杂水平与起始烟盒表面积成比例。作为烟盒表面积测量的替代,可以使用烟盒(玻璃)密度,因为其与烟盒表面积成反比。申请人发现,可以通过控制预成形件的径向烟盒表面积分布来实现所需的掺杂浓度分布。例如,二氧化硅烟盒预成形件在烟盒层的较内径向部分上具有较低密度(例如, $0.3\text{--}0.8\text{g}/\text{cm}^3$)以及在烟盒层的较外径向部分上具有较高密度(例如, $1.0\text{--}1.9\text{g}/\text{cm}^3$),当从外侧或内侧(例如用氯)进行蒸汽相掺杂时,在预成形件的内侧部分会比外侧部分具有更高的掺杂剂浓度。在一些实施方式中,优选在预成形件的内侧径向部分(至少在预成形件对应于外包层106的部分的最内10%径向距离上)具有约 $0.3\text{--}0.8\text{g}/\text{cm}^3$ 的密度,以及在预成形件的外侧径向部分(至少在预成形件对应于至少一部分的光纤外包层106的部分的较外10%径向距离上)具有 $1.0\text{--}1.9\text{g}/\text{cm}^3$ 的密度。例如,在一些实施方式中,优选在预成形件对应光纤的第一外包层部分106A的至少内侧径向比上具有约 $0.3\text{--}0.7\text{g}/\text{cm}^3$ 的平均密度,以及在预成形件对应外包层106的至少第二部分106B的外区域的较外径向部分上具有约 $1.2\text{--}1.8\text{g}/\text{cm}^3$ 的平均密度。在一些实施方式中,优选在预成形件的内侧径向部分(即,106A部分)上具有 $>15\text{m}^2/\text{g}$ 的平均表面积,以及在预成形件的较外径向部分上具有 $<10\text{m}^2/\text{g}$ 的平均表面积。在一些实施方式中,优选在预成形件的内侧径向部分

(对应于光纤的第一外包层部分106A的预成形件)上具有 $15\text{--}50\text{m}^2/\text{g}$ 的平均表面积,以及在预成形件的外侧径向部分(至少对应于光纤的第二外包层部分106B的最外10%径向距离的区域)上具有 $0.2\text{--}10\text{m}^2/\text{g}$ 的平均表面积。在一些实施方式中,优选在预成形件的内侧径向部分上具有 $15\text{--}50\text{m}^2/\text{g}$ 的表面积,以及在预成形件的外侧径向部分上具有 $0.5\text{--}5\text{m}^2/\text{g}$ 的表面积。在掺杂步骤之后,经掺杂的烟炱预成形件加热至 $>1400^\circ\text{C}$ 从而使得预成形件完全致密化,导致包括如下掺杂曲线的预成形件,其在预成形件的较内部分上显示出比预成形件的较外部分更高的掺杂剂(例如,预成形件对应于第一外包层部分106A的部分上的掺杂剂浓度会高于预成形件对应于光纤的第二外包层部分106B的部分中的掺杂剂浓度)。

[0164] 通过如下方式制造第二实施例光纤预成形件实施方式:在使得烟炱预成形件(初始密度为 $0.45\text{g}/\text{cm}^3$)两次横向通过热区(峰值温度为 1500°C ,从 1000°C 开始的加热速率为 $25^\circ\text{C}/\text{分钟}$)之后,使得 6500g 二氧化硅烟炱预成形件的较外部分致密化。更具体来说,该实施例的结果如图4B所示,其中,该图显示预成形件外包覆层的密度的演变,当其以 $50\text{mm}/\text{分钟}$ 的横穿速度(对应 $25^\circ\text{C}/\text{分钟}$ 的加热速率)两次横穿热区时,其具有 $0.45\text{g}/\text{cm}^3$ 的起始密度以及 1000°C 的起始温度,得到平均玻璃或烟炱密度约为 $1.7\text{--}1.8\text{g}/\text{cm}^3$ 的较外部分(预成形件的最外10%,或者 $0.9r_p$ 至 r_p 的径向距离,其中, r_p 是预成形件的最外半径),而该预成形件对应外包层的第一部分的较内部分保持在约为 $0.45\text{g}/\text{cm}^3$ 的平均玻璃或烟炱密度。因为预成形件的较外包覆层的较外区域的密度增加,该区域(106B_p)的表面积明显低于预成形件的较内部分的表面积(例如,低于层106A_p的表面积)。在部分致密步骤结束之后,预成形件(因而外包层区域)暴露于氯前体(例如,He中的 Cl_2),后续固结。因此,在该实施例中,外包覆层的较外部分106B_p掺杂的氯量较低,因为在掺杂步骤期间,该区域的表面积低于预成形件的较内部分(层104_p和106A_p)。从该预成形件拉制光纤,通过如图2B所示的工艺获得光纤分布。

[0165] 图4C显示以两种不同张力拉制的实施方式中,在第二外包覆层106B中的轴向应力与光纤的应力消除参数 Φ 的关系。还绘制了表1A-1F中的三个比较例光纤(比较例1、2和3)。这些比较例仅具有第一外包覆层,其到达光纤的较外边缘(即,它们没有第二外包覆层),以及这些附图和表格中所示的轴向压缩是第一外包覆层的。结果显示,具有 $\Phi \geq 5$ 的应力减轻参数的光纤实施方式100对应如下第二外包层106B,其处于 50g 控制张力时轴向张力具有 $\geq 0.3\text{MPa}$ 的轴向应力以及处于 150g 控制张力时轴向张力具有 ≥ 1 的轴向应力,从而 $\Phi \geq 5$ 的第二包覆层实现了上文所述的较低光纤衰减。但是,光纤100可以以 $20\text{--}400\text{gf}$ 的张力(即, $20\text{--}400\text{g}$ 控制张力)拉制。

[0166] 表1和2所揭示的光纤实施方式100的许多实施例是符合ITU G.652和G.654标准的。表1和2中的光纤具有 1550nm 时 $\leq 0.19\text{dB}/\text{km}$ 的低衰减,在一些实施方式中,光纤衰减 $\leq 0.185\text{dB}/\text{km}$,在一些其他实施方式中, $\leq 0.18\text{dB}/\text{km}$,在一些其他实施方式中, $\leq 0.17\text{dB}/\text{km}$ 。

[0167] 本领域的技术人员显而易见的是,可以在不偏离要求专利权的主题的精神和范围的情况下,对本文所述的实施方式进行各种修改和变动。因此,本说明书旨在涵盖本文所述的各种实施方式的修改和变化形式,且这些修改和变化形式落入所附权利要求及其等同内容的范围之内。

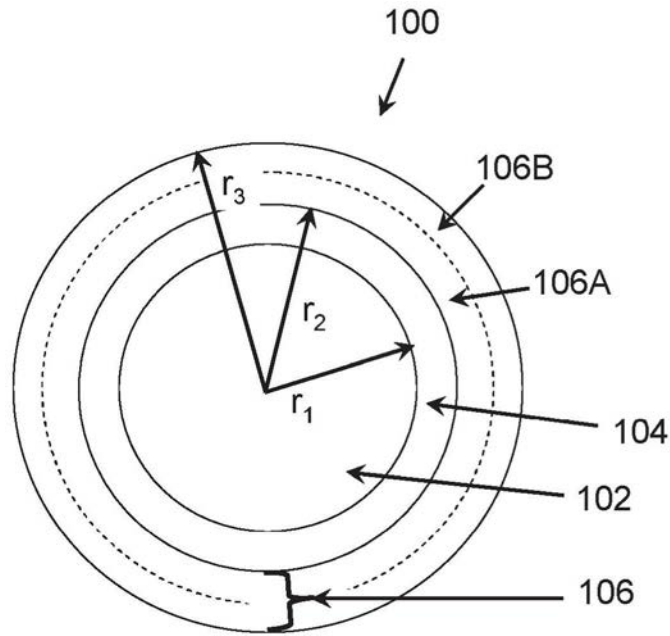


图1A

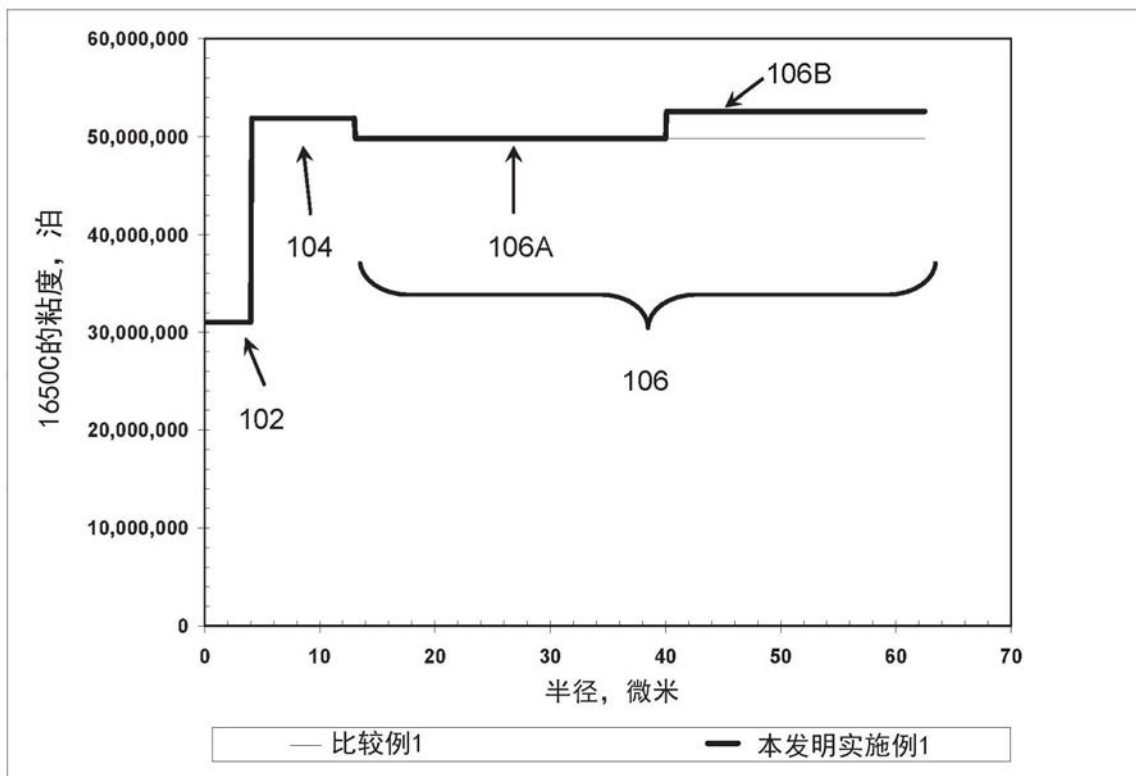


图1B

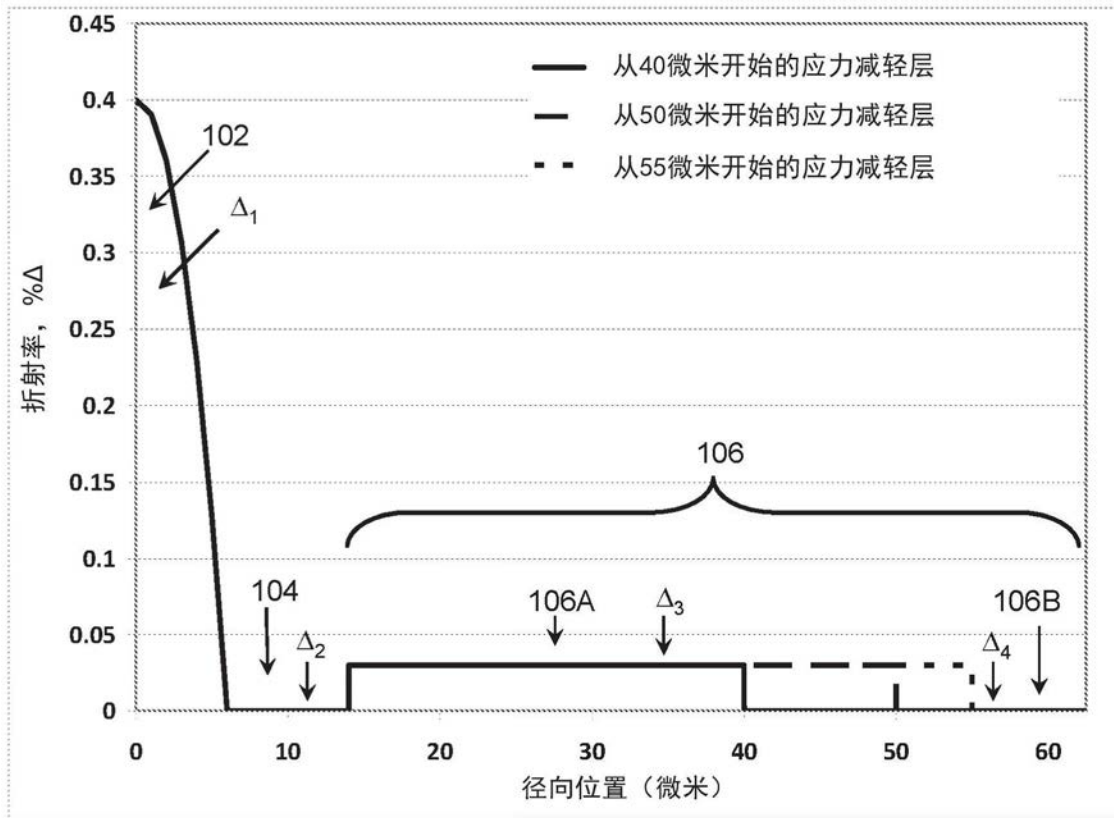


图2A

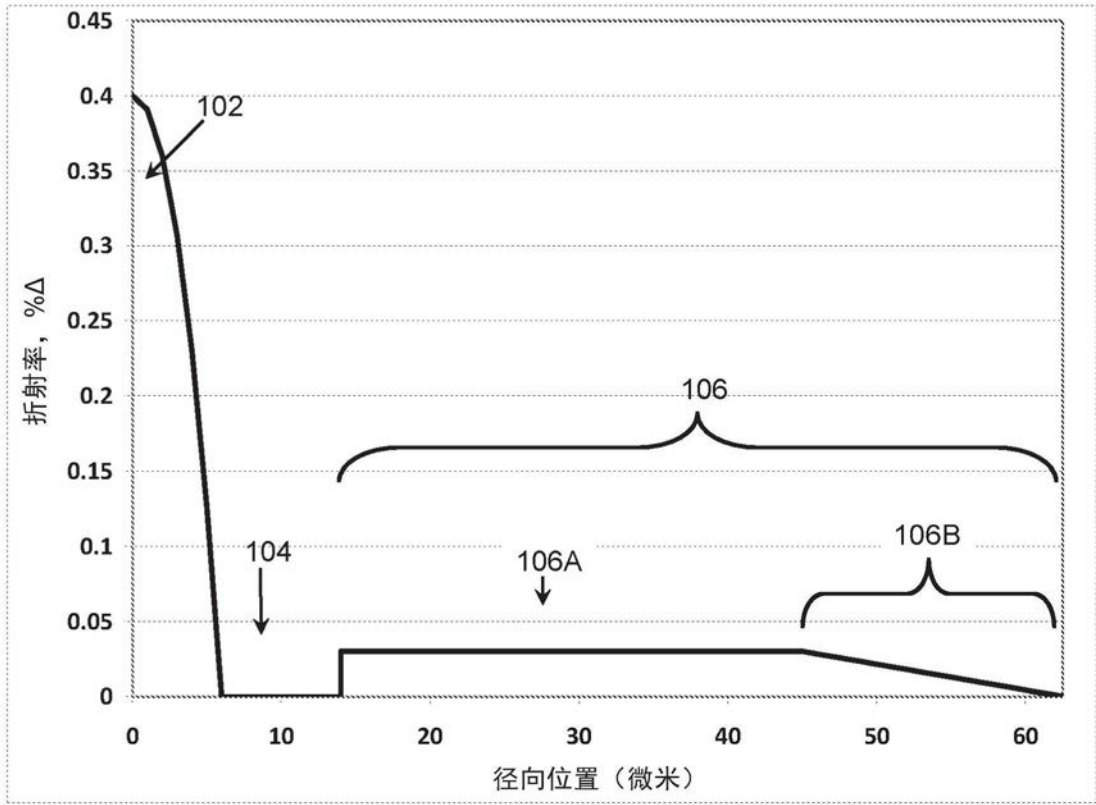


图2B

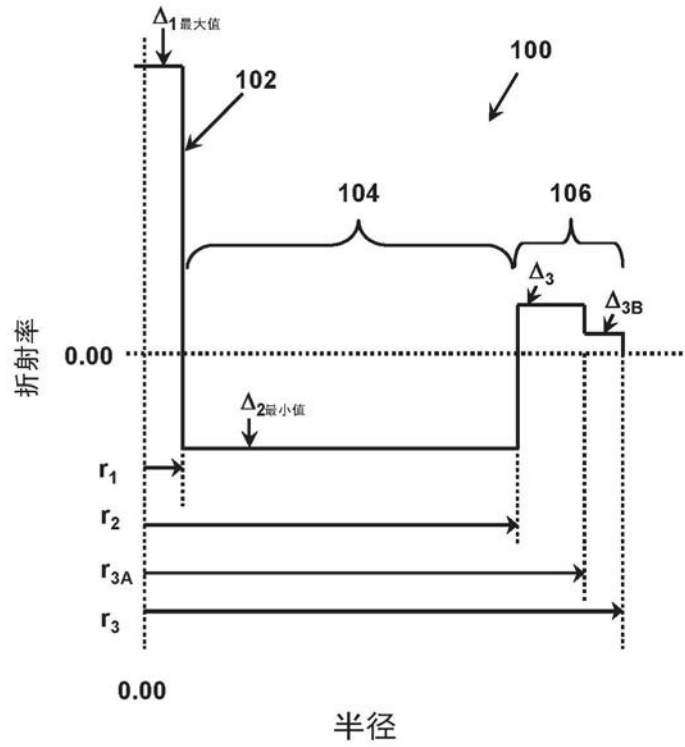


图2C

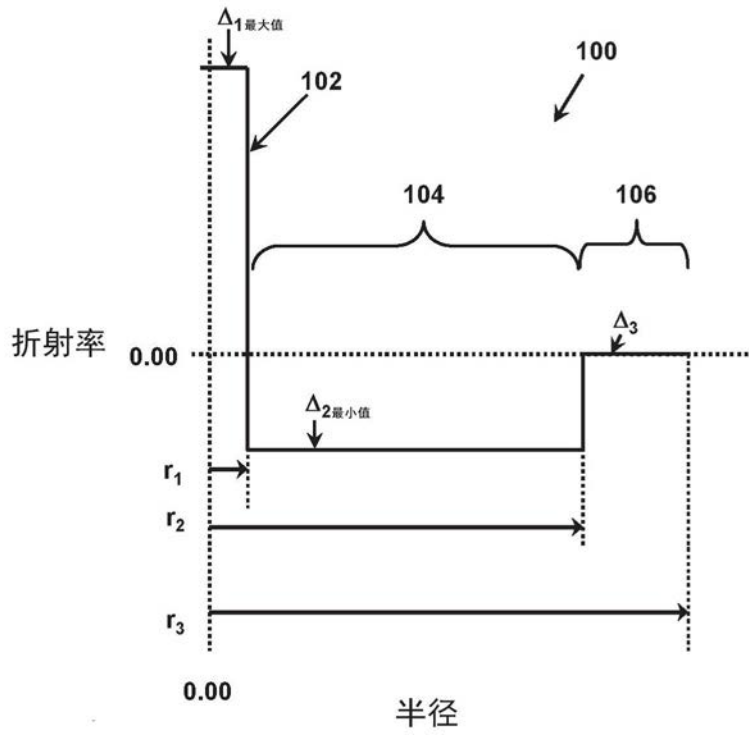


图2D

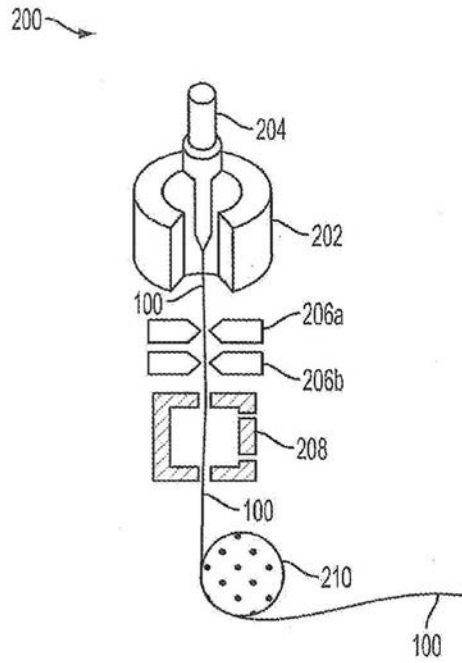


图3

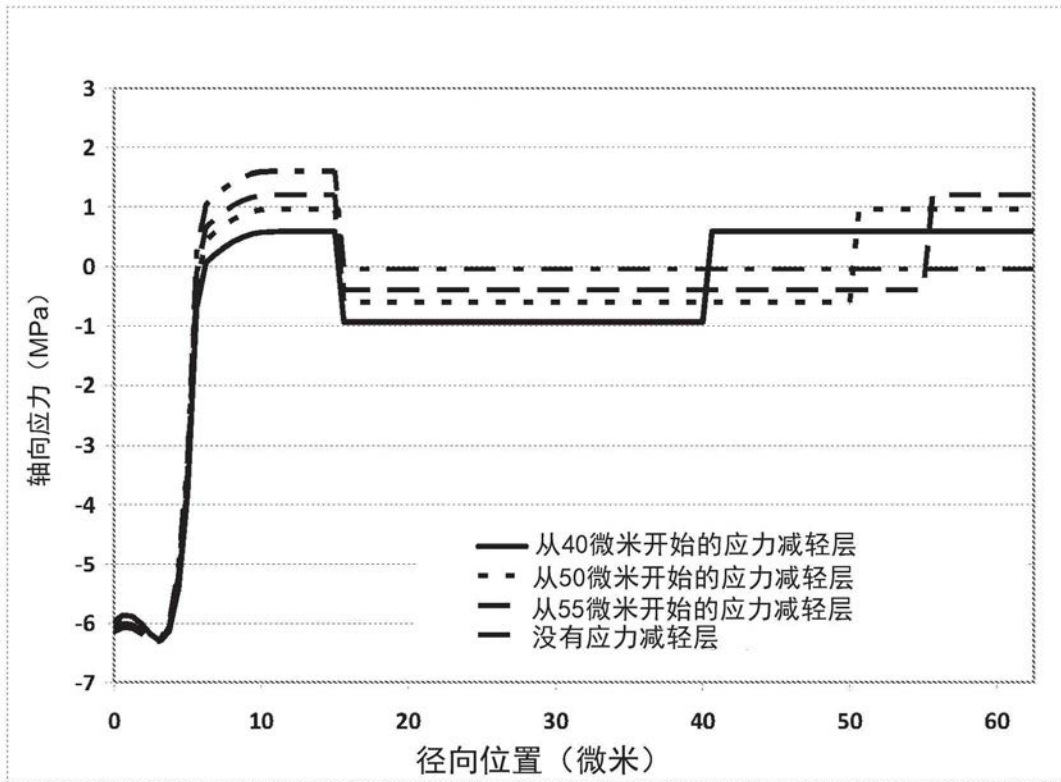


图4A

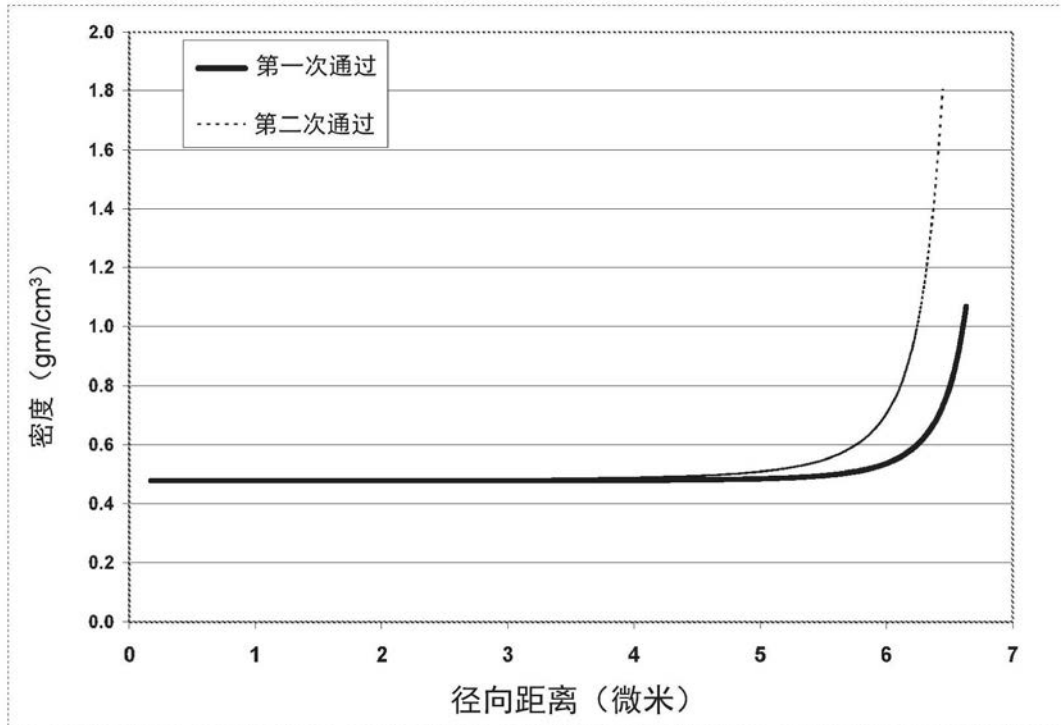


图4B

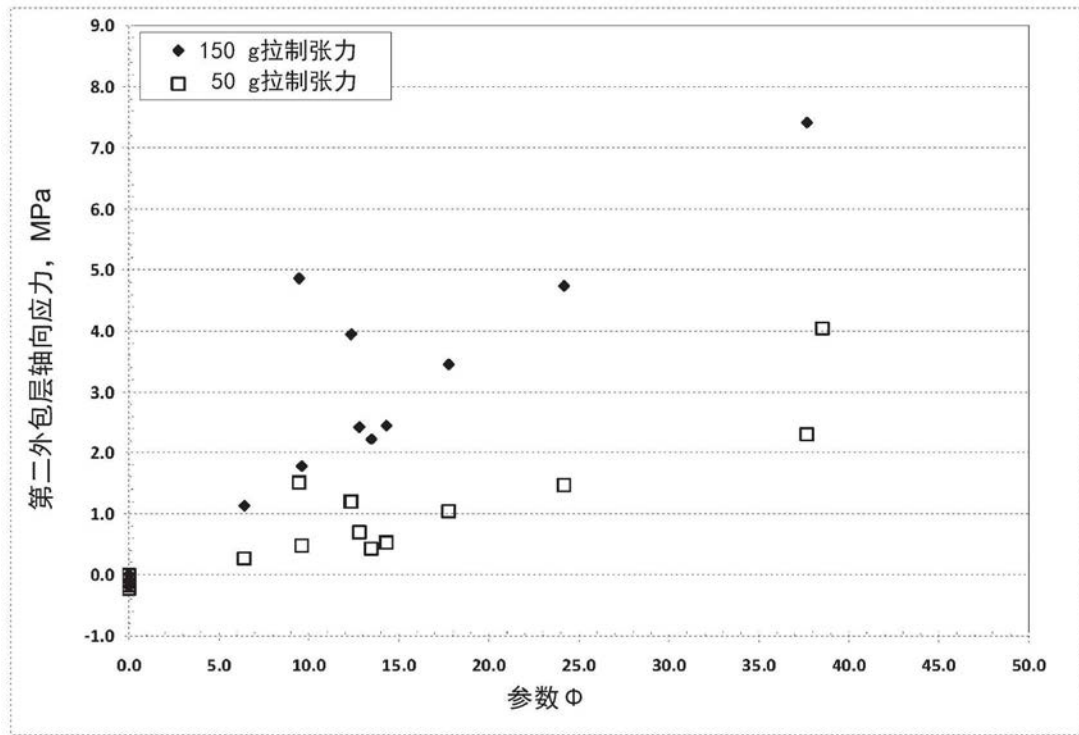


图4C