

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl.

G02B 6/036 (2006.01)

G02B 6/032 (2006.01)



[12] 发明专利申请公布说明书

[21] 申请号 200880023349.X

[43] 公开日 2010 年 3 月 31 日

[11] 公开号 CN 101688947A

[22] 申请日 2008.4.23

[21] 申请号 200880023349.X

[30] 优先权

[32] 2007.5.7 [33] US [31] 60/928,052

[86] 国际申请 PCT/US2008/005239 2008.4.23

[87] 国际公布 WO2008/136929 英 2008.11.13

[85] 进入国家阶段日期 2010.1.4

[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·比克汉姆

D·C·布克宾德 M·李

S·K·米什拉 D·A·诺兰

P·坦登

[74] 专利代理机构 上海专利商标事务所有限公司

代理人 沙永生 周承泽

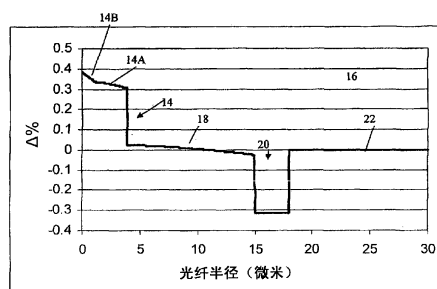
权利要求书 2 页 说明书 19 页 附图 3 页

[54] 发明名称

含碱金属氧化物的光纤

[57] 摘要

揭示一种具有氧化硅基芯的光纤，该芯包含选自 K_2O 、 Na_2O 、 LiO_2 、 Rb_2O 、 Cs_2O 及其混合物的碱金属氧化物，这些碱金属氧化物在所述芯中的平均浓度约为 10 - 10000 重量 ppm，该光纤还具有氧化硅基覆层，该覆层包围该芯并与其直接相邻，该覆层包括折射率低于该覆层其余部分的区域。通过适当选择该芯中碱金属氧化物掺杂剂的浓度和覆层，可获得低损耗光纤，其显示小于 1400 纳米的光缆截止、1550 纳米时约 13 - 19 皮秒/纳米/千米的色散、以及小于约 1324 纳米的零色散波长。



1. 一种光纤，该光纤包括：

氧化硅基芯，所述芯包含选自 K_2O 、 Na_2O 、 LiO_2 、 Rb_2O 、 Cs_2O 及其混合物的碱金属氧化物，这些碱金属氧化物在所述芯中的平均浓度约为 10-10000 重量 ppm，和包围该芯的氧化硅基覆层，所述氧化硅基覆层包括至少一个其折射率 Δ 低于所述覆层其余部分的环形区域，该环形区域包含随机分布的空隙、氟或它们的混合物，所述环形区域与所述芯隔开。

2. 如权利要求 1 所述的光纤，其特征在于，所述碱金属氧化物在所述芯中的浓度约为 50-1000ppm。

3. 如权利要求 1 所述的光纤，其特征在于，所述环形区域与所述芯间隔的距离至少为 5 微米。

4. 如权利要求 1 所述的光纤，其特征在于，所述环形区域包含平均直径小于约 2000 纳米的随机分布的空隙。

5. 如权利要求 1 所述的光纤，其特征在于，所述碱金属氧化物是 K_2O 。

6. 如权利要求 1 所述的光纤，其特征在于，所述芯基本不含锗。

7. 如权利要求 1 所述的光纤，其特征在于，所述光纤显示小于 1260 纳米的光缆截止，小于 1350 纳米的零色散波长，1310 纳米时小于 0.09 皮秒/平方纳米/千米的色散斜率，1550 纳米时小于 0.18 分贝/千米的衰减，以及 1550 纳米时大于 70 平方微米的有效面积。

8. 如权利要求 7 所述的光纤，其特征在于，所述光纤显示在 1550 纳米时 20 毫米宏观弯曲引发损耗小于 1 分贝/圈。

9. 如权利要求 8 所述的光纤，其特征在于，所述光纤显示在 1550 纳米时 20 毫米宏观曲折引发损耗小于 0.5 分贝/圈。

10. 如权利要求 7 所述的光纤，其特征在于，所述光纤显示小于 1324 纳米的零色散波长。

11. 如权利要求 7 所述的光纤，其特征在于，所述光纤显示在 1550 纳米时色散斜率小于 0.07 皮秒/平方纳米/千米。

12. 如权利要求 7 所述的光纤，其特征在于，所述光纤显示在 1550 纳米时有限面积大于 90 平方微米和衰减小于 0.17 分贝/千米。

13. 如权利要求 1 所述的光纤，其特征在于，所述芯进一步包含平均量大于

约 500 重量 ppm 的氟。

14. 如权利要求 1 所述的光纤，其特征在于，该芯具有的折射率曲线，相对于外部覆层，峰值相对折射率 $\Delta_{\max}$ 大于 0.2%。

15. 如权利要求 7 所述的光纤，其特征在于，所述环形区域与所述芯间隔的距离至少为 5 微米。

16. 如权利要求 12 所述的光纤，其特征在于，所述环形区域与所述芯间隔的距离至少为 10 微米。

17. 如权利要求 1 所述的光纤，其特征在于，所述覆层包括含氟掺杂氧化硅的第一环形区域、以及包围所述第一环形区域的第二环形区域，所述第二环形区域包含随机分布的空隙。

18. 如权利要求 17 所述的光纤，其特征在于，所述覆层包括第一环形区域以及包围所述第一环形区域的第二环形区域，所述第一环形区域包含大于 500ppm 的氟掺杂氧化硅，所述第二环形区域包含随机分布的空隙。

19. 如权利要求 1 所述的光纤，其特征在于，所述第二环形区域进一步包含大于 3 重量%的氟。

20. 如权利要求 17 所述的光纤，其特征在于，所述覆层包括含氟掺杂氧化硅的第三环形区域，该第三环形区域包围所述第二环形区域。

21. 一种光纤，该光纤包括氧化硅基芯，其中所述芯基本不含氧化锆，和包围该芯并与其相邻的第一氧化硅基覆盖区域，所述第一氧化硅基覆盖区域包括低于所述芯的折射率 Δ ，和

包围所述第一氧化硅基覆盖区域的第二氧化硅基覆盖区域，所述第二氧化硅基覆盖区域具有低于所述第一氧化硅基覆盖区域的折射率 Δ ，所述第二氧化硅基覆盖区域与所述芯间隔的距离至少为 5 微米。

22. 如权利要求 21 所述的光纤，其特征在于，该第二覆盖区域包含随机分布的空隙，所述第二氧化硅基覆盖区域与所述芯间隔的距离至少为 10 微米。

23. 如权利要求 21 所述的光纤，其特征在于，该第二覆盖区域不含随机分布的空隙，所述第二覆盖区域显示小于-0.2%的相对折射率 Δ 。

24. 如权利要求 21 所述的光纤，其特征在于，该第二覆盖区域不含随机分布的空隙，所述第二覆盖区域的轮廓体积 V_3 的绝对值大于 20。

含碱金属氧化物的光纤

相关申请交叉引用

本申请要求 2007 年 5 月 7 日提交的美国临时专利申请第 60/928052 号的权益和优先权，以其内容为依据并将其全部内容通过参考结合于此。

发明领域

本发明一般涉及掺杂有碱金属氧化物的光纤及其制造方法和设备。

技术背景

衰减是光纤的一个主要限制属性。例如，光纤损耗在设定光纤放大器之间的限制距离时起到重要作用。这在长距离和超长距离网络(例如海底应用)中尤其重要，这时，这些放大器代表了明显的系统成本，以及系统可靠性中的主要因素。因此，在开发具有降低衰减的光纤方面存在巨大商业利益。

发明概述

本发明的一个宽泛方面涉及包括氧化硅基芯和覆层的光纤，其中，该芯包含选自 K_2O 、 Na_2O 、 Li_2O 、 Rb_2O 、 Cs_2O 及其混合物的碱金属氧化物，这些碱金属氧化物在所述芯中的平均浓度约为 10-10000 重量 ppm。包围芯的覆层优选至少包括折射率 $\Delta\%$ 低于芯的第一环形区域，以及折射率 $\Delta\%$ 低于第一环形区域的第二环形区域。优选该第二环形区域包含随机分布的空隙、氟或其混合物。术语“孔”和“空隙”在本文中可交换使用。优选第二环形区域与芯(被第一环形区域)间隔的距离至少为 5 微米，最优选至少 10 微米。优选第二环形区域被第三环形覆盖区域包围，该第三环形覆盖区域的折射率 Δ 高于第二环形覆盖区域。优选该第二环形区域的折射率 Δ 比第一环形区域低至少 0.1 $\Delta\%$ 、更优选至少 0.2 $\Delta\%$ ，并且优选比第一和第三环形区域都低。在一些优选的实施方式中，所述芯中碱金属氧化物的浓度约为 50-1000ppm。在第二环形区域包含多个随机分布空隙的实施方式中，这些空隙优选具有小于约 2000 纳米的平均直径。

在一些优选的实施方式中，芯基本不含锗，更优选无锗。这时，通过在优

选与芯紧邻的第一环形区域中采用氟掺杂，将使芯折射率相比邻近区域为正。优选可采用随机分布的空隙、氟或其混合物形成第二环形区域。在优选的实施方式中，覆层包括含有氟掺杂氧化硅的第三环形区域，该第三环形区域包围所述第二环形区域。根据本发明的一个方面，一种光纤包括：从中线延伸至半径 R_1 的玻璃芯；包围该芯并与其接触的玻璃覆层，该覆层包括：(i) 从 R_1 延伸至半径 R_2 的第一环形区域，其内部区域包括径向宽度 $W_2=R_2-R_1$ ，(ii) 从 R_2 延伸至半径 R_3 的第二环形区域，该第二环形区域包括径向宽度 $W_3=R_3-R_2$ ，和(iii) 从 R_3 延伸至最外玻璃半径 R_4 的第三环形区域。该芯优选包括相对于第三环形覆盖区域的最大相对折射率 Δ_{1MAX} ， $0.2\% < \Delta_{1MAX} < 0.6\%$ 。第一环形覆盖区域优选包括折射率 $|\Delta_2(r)| < 0.05\%$ 。第二环形区域优选包括相对于第三环形区域的最小相对折射率 Δ_{3MIN} ，其中 $\Delta_{3MIN} < -0.1$ ，更优选 $< -0.3\%$ 。换言之，在该实施方式中， $\Delta_{1MAX} > \Delta_{2MAX} > \Delta_{3MIN}$ 且 $\Delta_{1MAX} > \Delta_{2MIN} > \Delta_{3MIN}$ 。本实施方式的芯和覆层能够提供具有以下性质的光纤：光缆截止(cable cutoff)小于 1500 纳米，1550 纳米时的衰减小于 0.18 分贝/千米，1550 纳米时的有效面积大于 72 平方微米、较优选大于 75 平方微米、甚至更优选大于 85 平方微米、最优选大于 95 平方微米。第二环形区域可包含掺杂有氟或随机分布的空隙或其组合的氧化硅玻璃。

或者，第二环形区域可包含具有许多随机分布的闭合孔的氧化硅玻璃，这些孔是中空(真空)或填充气体的，这些孔提供光的内部反射，从而为光沿着芯行进提供波导。这些孔优选填充有氮和氦的混合物。这些孔可提供与例如纯氧化硅相比低的有效折射率。第二环形区域 20 具有下式定义的轮廓体积(profile volume) V_3 ：

$$2 \int_{R_2}^{R_3} \Delta_3(r) r dr$$

优选 $\Delta_{1MAX} < 0.6\%$ 、 $\Delta_{2MIN} > -0.05\%$ 、 $\Delta_{2MAX} < 0.05\%$ 、 $\Delta_{3MIN} < -0.1\%$ ，更优选小于 -0.25% ，第二环形区域的轮廓体积绝对值 $|V_3|$ 大于 20%-平方微米。甚至更优选 $\Delta_{3MIN} < -0.45\%$ ，并且在一些情况下可能 $\Delta_{3MIN} \leq -0.7\%$ 。

在一些实施方式中，20%-平方微米 $< |V_3| < 80\%$ -平方微米。在其他实施方式中，30%-平方微米 $< |V_3| < 70\%$ -平方微米。在其他实施方式中，40%-平方微米 $< |V_3| < 60\%$ -平方微米。

在一些情况中，优选 $0.2\% < \Delta_{1MAX} < 0.6\%$ ，在其他情况中，优选 $0.20\% <$

$\Delta_{\text{MAX}} < 0.40\%$ 。

在一些实施方式中 $W_3 > 1.0$ 微米，在其他实施方式中 $1.0 < W_3 < 10.0$ 微米，在一些实施方式中 $W_3 < 8.0$ 微米，在其他实施方式中 $2.0 < W_3 < 4.0$ 微米。

通过对第二环形区域的体积进行选择，可改善弯曲损耗，弯曲损耗定义为第二环形区域的横截面面积与 $\Delta V_{3\text{MIN}}$ 的绝对值的乘积(百分比乘平方微米，%-平方微米)。第二环形区域的体积影响实际光纤和光缆截止波长。要使光缆截止波长小于 1500 纳米，则优选 $|V_3|$ (第二环形区域的体积绝对值) 小于 80%-平方微米。

使用本文揭示的光纤设计，可得到表现出以下性质的光纤：光缆截止小于 1300 纳米、更优选小于 1260 纳米，1550 纳米时的色散约为 13-19 皮秒/纳米/千米(ps/nm/km)、更优选为 14-18 皮秒/纳米/千米，零色散波长小于约 1420 纳米、更优选小于约 1350 纳米、最优选小于约 1324 纳米；优选表现出以下性质：1310 纳米时的色散斜率小于约 0.092 皮秒/纳米/千米、更优选小于或等于约 0.090 皮秒/纳米/千米，1550 纳米时的色散斜率小于约 0.07 皮秒/平方纳米/千米。

本文揭示的光纤还能表现出以下性质：1550 纳米时的有效面积大于约 70 平方微米、较优选大于 75 平方微米、甚至更优选大于 85 平方微米、最优选大于 95 平方微米，同时，1550 纳米时的衰减小于 0.18 分贝/千米、更优选小于 0.175 分贝/千米、最优选小于 0.17 分贝/千米。这种光纤还表现出以下性质：1550 纳米时的 15 毫米弯曲损耗小于 5 分贝/圈，20 毫米弯曲引发损耗小于 1 分贝/圈(Db/turn)、优选小于 0.5 分贝/圈、更优选小于 0.1 分贝/圈，30 毫米弯曲损耗小于 0.04 分贝/圈。

所述芯中存在的碱金属氧化物的平均浓度优选约为 50-500 重量 ppm，更优选约 100-300 重量 ppm。光纤的芯优选基本不含氧化锆，更优选不含氧化锆掺杂剂。该芯可包含氟，在一些实施方式中，所述芯中氟的平均浓度优选大于所述芯中碱金属氧化物的平均浓度。光纤的芯以及光纤的覆层可另外包含氯，在一些优选的实施方式中，所述芯中氯的平均浓度优选大于所述芯中碱金属氧化物的平均浓度。本文所用“平均浓度”表示就整个芯而言的平均浓度。因此，例如，如果芯内部的 50%表现出 300 重量 ppm 的 K_2O ，芯外部的 50%表现出 400 重量 ppm 的 K_2O ，则该芯中 K_2O 的平均浓度将为 350ppm。 K_2O 是根据本发明掺杂的最优选碱金属氧化物。

所述光纤的芯优选包含平均浓度大于约 750 重量 ppm 的氯。覆层是包围芯并优选与其直接相邻的氧化硅基覆层。该覆层优选包含大于 10000ppm 的氟。该芯优选基本不含锗，更优选该芯无锗。

在一种优选的实施方式中，所述光纤的芯包括沿着芯中线的第一区域，该区域包含小于 100ppm 的氯，所述光纤的芯还包括包围所述第一区域的第二芯区域，其中所述氯含量大于 100ppm。该第一区域还优选包含大于所述第二区域中最低氟含量的最大氟量。

在不含作为掺杂剂的锗的实施方式中，芯中氯的平均浓度优选大于 500ppm、较优选大于 750ppm、甚至更优选大于 1000ppm。芯中氟的平均浓度优选大于 500ppm、较优选大于 750ppm、甚至更优选大于 1000ppm、最优选大于约 1500ppm。

使用本文揭示的光纤设计，可制造表现出以下性质的光纤：1310 纳米时衰减小于约 0.30 分贝/千米，1550 纳米时小于约 0.18 分贝/千米；优选 1550 纳米时小于约 0.175 分贝/千米，更优选 1550 纳米时小于约 0.17 分贝/千米。同时，本文揭示的光纤在 1550 纳米时 20 毫米弯曲引发损耗小于 1 分贝/圈、优选小于 0.5 分贝/圈、更优选小于 0.25 分贝/圈。

优选光纤的芯和覆层都包含碱金属氧化物掺杂剂。该光纤具有至少一个芯段；但是，这并非关键，该光纤或可包括多个芯段。

该光纤的芯优选包含小于 20ppb 的 OH。

以下详细说明中将提出本发明的其他特征和优点，这些其他特征和优点中的一部分对于了解以下说明的本领域技术人员而言将是显而易见的，或者本领域技术人员按本文所述、包括以下详细说明、权利要求以及附图通过实施本发明将部分地认识到这些其他特征和优点。

应当理解，以上一般说明和以下详细说明都提出本发明的实施方式，意在提供理解要求权利的本发明性质和特征的概述或框架。包括附图以提供对本发明的进一步理解，附图结合在本说明书中并构成说明书的一部分。附图图示本发明的各种实施方式，以及用于解释本发明原理和操作的描述。适当地用相同的附图标记表示相同的特征。

附图简要说明

图 1 是根据本发明的阶跃折射率光纤折射率曲线图。

图 2 显示沉积玻璃烟炱(glass soot)的方法。

图 3 示出用碱金属氧化物掺杂玻璃管的方法。

图 4 说明拉制玻璃棒的过程。

发明详述

本发明涉及低损耗光纤及其制造方法。更具体地说，本发明涉及掺杂有碱金属氧化物掺杂剂的光纤以及制造该光纤的方法和相关预制品。本文使用的以下术语具有以下含义：

– “模场直径”是对在单模光纤端面上的光功率的量度，表示为：

$$2\omega_0 = (\lambda/\pi)[2 \int I(\Phi) \sin \Phi \cos \Phi d\Phi] / [\int I(\Phi) \sin^3 \Phi \cos \Phi d\Phi]^{1/2} \quad (1)$$

其中 $2\omega_0$ 是模场直径(因此 ω_0 是模场半径)， λ 是光的平均波长， Φ 是相对于辐射图中心的角度，优选从 0° 至 90° 进行积分。例如可根据测试方法 ANSI/TIA/EIA-455-191-A-2001 测量模场直径。

– “有效面积”是

$$A_{eff} = 2\pi \left(\int_0^\infty E^2 r dr \right)^2 / \left(\int_0^\infty E^4 r dr \right) \quad (2)$$

其中积分限是 0 至 ∞ ，E 是与传播光相关的电场。

“光缆截止波长”或“光缆截止”甚至低于测得的光纤截止，因为光缆环境中存在更高水平的弯曲和机械压力。使用例如在 EIA-455-170 传输功率导致的单模光纤光缆截止波长或 FOTP-170 中描述的 22 米测试进行光缆截止测量。

本文所用“光缆截止”表示使用 EIA-445 光纤测试方法中所述的测试获得的值。

– “相对折射率 Δ ”用等式 $\Delta_i = (n_i^2 - n_c^2) / 2n_i^2$ 定义，其中 n_i 是折射率曲线段 i 的最大折射率， n_c 是外覆层的折射率。相对折射率一般表示为百分比，例如在本文中表现为“ Δ 百分比”或“ $\% \Delta$ ”。

– “芯”表示具有一般高于覆层的折射率的光纤的部分，因此传输的光功率主要通过芯传播。芯可包括一个或多个段。单独的芯段可具有大于纯氧化硅、等于纯氧化硅、或小于纯氧化硅的折射率。

– “ppm”，除非有另外的指明，否则表示“每百万分之的重量份数”。

如图 1 所示，在优选的实施方式中，本文揭示的光纤优选包括芯和包围芯的覆层。优选覆层包围芯并与其直接相邻。优选芯基本不含氧化锆，更优选芯

不含氧化锆。在一些优选的实施方式中，芯由单个芯段（即中央芯段 14）和包围该中央芯段并与其直接相邻的覆层 16 构成，如图 1 以及图 1 中各示例轮廓所示，如具有阶梯状、圆形、 α 或三角形形状的轮廓，其中该中央芯段具有相对于覆层为正的折射率 $\Delta_1(r)$ 。在其他优选的实施方式中，该芯包括多个芯段，例如中央芯段、包围中央芯段并与其直接相邻的第一环形芯段、以及包围第一环形芯段并与其直接相邻的覆层，其中该中央芯段具有相对于覆层为非负、优选为正的相对折射率 $\Delta_1\%(r)$ ，该第一环形芯段为纯氧化硅，具有相对于覆层为非负、优选为正的相对折射率 $\Delta_2\%(r)$ 。

在图 1 所示的实施方式中，芯段 14 优选从光纤中心延伸至约 2-8 微米、更优选 3-6 微米、最优选 3.5-4.5 微米，覆层部分 16 从芯的外半径延伸至光纤的最外半径。如图 1 所示，优选的实施方式至少采用第一芯区域 14A（其包括折射率 Δ_1 ）和覆层区域 16（其包括低于 Δ_1 的折射率 Δ ）。整个芯段 14 上的平均折射率优选约为 $0.1-0.5\% \Delta$ 、更优选约为 $0.3-0.4\% \Delta$ 。区域 14A 的优选 Δ_1 值约为 $0.25-0.45\% \Delta$ ，更优选约为 $0.30-0.35\% \Delta$ 。区域 14A 可在整个光纤中线上持续其斜率，或者芯区域 14 还可任选包括区域 14B，如果采用区域 14B，则其包括优选大于 Δ_1 的 Δ_0 。如果沿着光纤中线采用芯区域 14B，则区域 14B 的峰值折射率 Δ_0 的优选值约为 $0.25-0.60\% \Delta$ ，更优选约为 $0.36-0.46\% \Delta$ ，采用区域 14B 时优选其峰值折射率高于芯区域 14A。因此，在优选的实施方式中，芯段 14 沿着光纤中线的折射率高于芯区域 14 最外部附近的折射率。

包围芯的覆层 16 优选至少包括其折射率 $\Delta_2\%$ 低于芯 14 的第一环形区域 18、以及其折射率 $\Delta_3\%$ 低于第一环形区域 18 的 Δ_2 的第二环形区域 20。优选该第二环形区域 20 包含随机分布的空隙、氟或它们的混合物。优选该第二环形区域 20 与芯（例如被第一环形区域 18 的宽度）间隔的距离至少为 5 微米，最优选至少为 10 微米。优选第二环形区域 20 被具有 Δ_4 的外部覆盖区域 22 包围，在优选的实施方式中，该外部覆盖区域掺杂有氟，并优选延伸至玻璃光纤的最外围。

在第二环形区域 20 包含许多随机分布的空隙的实施方式中，这些空隙或孔优选非周期性地分布于环形区域 20 中。“非周期性地设置”或“非周期性的分布”表示在光纤横截面（例如垂直于纵轴的横截面）观察时，非周期性设置的孔随机或非周期性地分布在含孔区域中。沿着光纤长度在不同点截取的横截面将显示不同的横截面孔图案，即，各横截面将具有不同的孔图案，其中，各孔的分布以及各孔的尺寸并不相符。即，这些空隙或孔是非周期性的，它们非周

期性地位于光纤结构内。这些孔沿着光纤长度(即平行于纵轴)伸展(拉长的),所以它们沿着光纤纵轴比横跨光纤直径更长,但是对于传输光纤的典型长度,它们并未延伸至光纤的整个长度。

如果在受限制的环形区域 20 中采用非周期性设置的孔或空隙,则要求所形成的这些孔或空隙中的大于 95%、优选全部在光纤覆层中的平均孔径小于 1550 纳米、更优选小于 775 纳米、最优选小于约 390 纳米。类似地,优选光纤中这些孔的最大直径小于 7000 纳米、较优选小于 2000 纳米、甚至更优选小于 1550 纳米,最优选小于 775 纳米。在一些实施方式中,在横截面观察所述光纤时,环形含孔区域包含大于 10 个孔、较优选大于 100 个孔、甚至更优选大于 400 个孔、最优选大于 600 个孔。事实上,本文揭示的技术足以在光纤环形环中获得大于 1000 个、甚至大于 2000 个孔,即使对于宽度小于 10 微米、更优选小于 7 微米的环形环也是如此。因此,例如,光纤的一种特别优选的实施方式将在光纤横截面中表现出大于 10 个、更优选大于 100 个孔,这些孔的最大直径小于 1550 纳米,平均直径小于 775 纳米。在一些实施方式中,非周期性设置的孔的平均直径小于 500、优选小于 300、更优选小于 200 纳米且大于 5 纳米。在一些其他实施方式中,在指定光纤垂直横截面中,本文揭示的光纤具有小于 1000 个孔,在其他实施方式中,孔的总数大于 10 且小于 500。对于其中采用随机分布的空隙的实施方式,这些实施方式优选采用约 1-10%、更优选 1.5-7.5%的空隙填充分数。本文所用“空隙填充分数”是以横截面观察光纤时,含空隙区域中空隙合并总面积除以含随机分布的空隙的区域(例如区域 20)的面积比值。当然,在一些实施方式中,光纤将表现出这些特征的组合。因此,例如,光纤的一种特别优选的实施方式将在光纤横截面中表现出大于 10、更优选大于 100 且小于 300 个孔,这些孔的最大直径小于 1550 纳米,平均直径小于 775 纳米。在一些实施方式中,非周期性设置的孔的平均直径小于 500、优选小于 300 且更优选小于或等于 200 纳米且大于 5 纳米。可以在放大倍数约 800 倍的扫描电子显微镜和图象分析软件(例如 ImagePro, 可从 Media Cybernetics, Inc., Silver Spring, Maryland, USA 获得)的帮助下计算孔数、平均直径、最大直径和孔的总空隙面积百分比。这些随机分布的空隙可包含一种或多种气体,例如氩、氮、氦、CO₂、SO₂ 或氧,或者这些孔可包含基本无气体的真空;不考虑是否存在任意气体,含孔区域的折射率因为存在这些孔而降低。这些孔可随机或非周期性地设置,但是在其他实施方式中这些孔是周期性

设置的。在一些实施方式中，许多孔包括许多非周期性设置的孔和许多周期性设置的孔。或者或另外的，如上所述，还可通过在含孔区域中对玻璃进行递降掺杂(downdoping)(例如用氟)或者在一个或两个包围区域中不进行掺杂(例如用氧化锗)来提供降低的折射率。

可通过利用预制品固结条件的方法制造区域 20，这些条件能有效捕获固结的玻璃坯件中的气体，从而导致在固结的玻璃光纤预制品中形成空隙。好于采用步骤去除这些空隙，可采用得到的预制品形成其中含有空隙、或孔的光纤。如本文所用，孔的直径是以垂直于光纤中轴的垂直横截面观察光纤时，其端点设置在限定该孔的氧化硅内表面上的最长线段。以下文献中更全面地描述了光纤中微结构化区域的应用和/或形成：2006 年 10 月 18 日提交的待审查美国专利申请序列第 11/583098 号、2006 年 6 月 30 日提交的美国临时专利申请序列第 60/817863 号、2006 年 6 月 30 日提交的美国临时专利申请序列第 60/817721 号、2006 年 8 月 31 日提交的美国临时专利申请序列第 60/841458 号、2006 年 8 月 31 日提交的美国临时专利申请序列第 60/841490 号、2007 年 1 月 8 日提交的美国临时专利申请序列第 60/879164 号，这些申请都转让给康宁公司，这些文献都通过参考结合于此。

本文揭示的光纤可能包含或可能不包含氧化锗或氟，来调节光纤的芯和/或覆层的折射率，但是也可在环形区域 20 中避免这些掺杂剂，而是使用孔(以及这些孔内可能设置的任何一种或多种气体)来调节将光引导通过光纤的芯的方式。如果环形区域 20 包含随机分布的空隙，则该区域可由未掺杂(无锗或氟)的氧化硅构成，从而完全避免在含孔区域中使用任何掺杂剂，以实现折射率的降低，或者该环形区域 20 可包含随机分布的空隙和掺杂的氧化硅，例如具有许多孔的氟掺杂的氧化硅。

芯区域优选包含选自 K_2O 、 Na_2O 、 LiO_2 、 Rb_2O 、 Cs_2O 及其混合物(最优选是 K_2O)的碱金属氧化物，这些碱金属氧化物在所述芯中的平均浓度约为 50-1000 重量 ppm。该芯还优选包含氯和氟。该芯优选基本不含锗，更优选不含锗。优选所述芯中氟的平均浓度大于所述芯中碱金属氧化物的平均量，并且所述芯中氯的平均量大于所述芯中碱金属氧化物的平均量。该光纤还优选包括氟掺杂的氧化硅基覆层(例如环形区域 18 和 22)，该覆层包围芯，并且在一些优选的实施方式中与芯直接相邻。优选该第二环形区域表现出至少比第一环形区域低 0.1 $\Delta\%$ 、更优选至少 0.2 $\Delta\%$ 的折射率 Δ ，并且优选比第一和第三环形区域都低。

在一些优选的实施方式中,该芯区域包括沿着芯中线设置的第一中央芯区域(延伸至约1微米),该第一中央芯区域的氯平均浓度优选低于芯的外部区域(即从约1微米延伸至约4微米)的氯平均浓度。具体地说,中央芯区域中存在的氯的平均浓度可小于100ppm、更优选小于50ppm,包围第一区域的第二或外部芯区域中的氯的平均浓度可大于500ppm、较优选大于750ppm、甚至更优选大于1000ppm、最优选大于1500ppm。芯区域中氯的峰值浓度优选大于500ppm、更优选大于1000ppm、最优选大于1500ppm。

中央芯区域中存在的氟的平均浓度优选大于500ppm、更优选大于750ppm、最优选大于1000ppm,包围第一区域的第二或外部芯区域中的氟的平均浓度类似地优选大于500ppm、更优选大于750ppm、最优选大于1000ppm。

整个芯区域中的氟的平均浓度优选大于500ppm、更优选大于750ppm、最优选大于1000ppm,并且优选小于5000ppm、更优选小于4000ppm。在所述实施方式中,所述第二芯区域中的氯的峰值浓度高于所述第二区域中的氟的峰值浓度,不过这种关系并非关键。优选芯区域中的氯和氟的平均浓度都大于约500ppm、更优选大于约750ppm、最优选大于约1000ppm。

在一些优选的实施方式中,本文揭示的光纤包含单个芯段(即中央芯段14)和包围该中央芯段并与其直接相邻的覆层16,其中该覆层具有相对于纯氧化硅为负的折射率,该芯包含氟以及选自 K_2O 、 Na_2O 、 LiO_2 、 Rb_2O 、 Cs_2O 及其混合物的碱金属氧化物,碱金属氧化物的峰值浓度为20-700ppm、优选50-500ppm、甚至更优选100-400ppm。

该光纤的芯区域14A包括峰值相对折射率(相对于覆层) Δ_{MAX} ,该峰值相对折射率 Δ_{MAX} 为0.2-0.5%、优选0.3-0.4%。该光纤包含大于90重量%的 SiO_2 ,优选大于或等于95重量%的 SiO_2 。

在图1所示的实施方式中,该光纤具有单个芯段14,其被覆层段16包围。优选碱金属氧化物浓度随半径变化。优选碱金属氧化物的浓度一般随从光纤中线沿光纤半径的至少一部分的半径的增加而减小。光纤的芯段14可一般具有图1中所示的阶梯形状,或者芯段14可具有圆形、 α 或三角形形状。

在根据本发明的一种实施方式中,如图1所揭示的光纤折射率曲线经过调整,得到具有以下性质的单模光纤:优选零色散波长 λ_0 小于1420纳米、较优选小于1350纳米、更优选小于1324纳米、最优选约为1280-1324纳米,1310纳米时的色散斜率小于约0.09皮秒/平方纳米/千米,1550纳米时的色散斜率

小于约 0.07 皮秒/平方纳米/千米、更优选小于约 0.065 皮秒/平方纳米/千米、最优选小于约 0.06 皮秒/平方纳米/千米, 1550 纳米时的总色散约为 13-19 皮秒/纳米/千米、更优选约为 14-18 皮秒/纳米/千米。但是, 可使用其他折射率曲线以获得这些相同性质。优选光纤的光缆截止波长小于约 1300 纳米, 更优选小于约 1260 纳米。优选该光纤在 1550 纳米时的有效面积大于约 70 平方微米, 更优选大于约 75 平方微米。该光纤的芯直径优选大于约 3 微米、更优选约为 3-5 微米, 在 1550 纳米时的模场直径大于约 9.5 微米、更优选约为 10-11 微米。通过根据本发明包含碱金属氧化物, 可制造具有以下性质的光纤: 在 1310 纳米时的衰减小于约 0.30 分贝/千米, 在 1550 纳米时的衰减小于约 0.18 分贝/千米; 更优选在 1550 纳米时的衰减小于约 0.175 分贝/千米, 最优选在 1550 纳米时的衰减小于约 0.17 分贝/千米。在本发明的一种优选实施方式中, 如实施例 9-12 的例子所述, 本发明光纤显示在 1550 纳米时衰减小于 0.18 分贝/千米, 更优选小于 0.17 分贝/千米, 并且在 1550 纳米时的色散/衰减大于 80 皮秒/纳米/分贝, 更优选大于 90 皮秒/纳米/分贝。在一些优选的实施方式中, 在 1550 纳米时的色散/衰减约为 80-110 皮秒/纳米/分贝, 甚至更优选约为 80-100 皮秒/纳米/分贝。这些实施方式的光纤的色散优选小于 18 皮秒/纳米/千米, 更优选小于 17 皮秒/纳米/千米。本文揭示的光纤显示 20 毫米直径弯曲损耗小于 1 分贝/圈、更优选小于 0.5 分贝/圈、最优选小于 0.25 分贝/圈。

下表 1 中列出根据本发明的这些光纤的实施例。在表 1 的各实施例中, 在第二环形覆盖区域 20 中采用随机空隙, 从而相对于覆盖区域 18 或 22 获得明显的递降掺杂效应。采用氧化硅玻璃的区域 20 包含随机分布的空隙, 平均空隙直径为 200 纳米。表 1 提供根据本发明的各实施例的内芯段 14B 的最大折射率 Δ_1 , 芯段 14 的平均折射率 Δ_1 (Δ 平均值), 芯区域 14 的半径 R_1 , 第一环形覆盖区域 18 的折射率 Δ_2 , 第一环形覆盖区域 18 的外半径, 第二环形覆盖区域 20 的宽度, 以及空隙填充分数。在所有实施例中, 芯中没有使用锆, 覆层在区域 18 和 22 中包含氟掺杂的氧化硅, 并区域 20 中包含随机分布的空隙。因此, 相对于外部氟掺杂的覆盖区域 22 取各段的折射率 Δ 。还在表 1 中列出各实施例在 1310 纳米时的色散, 在 1310 纳米时的色散斜率, 零色散波长, 在 1550 纳米时的色散, 在 1550 纳米时的色散斜率, 光缆截止波长, 在 1310 纳米和 1550 纳米时的模场直径, 在 1310 和 1550 纳米时的有效面积, 光缆截止波长, 以及在 1550 纳米时的衰减。

表 1

实施例	1	2	3	4	5	6	7	8
14B MAX Δ_1 , (%)	0.38	0.38	0.36	0.35	0.42	0.34	0.30	0.28
芯 14 平均 Δ_1 , (%)	0.33	0.33	0.31	0.29	0.37	0.29	0.25	0.23
芯半径 R_1 (微米)	3.9	3.9	4.05	3.91	3.9	3.9	3.9	3.9
区域 18 Δ_2 , (%)	0	0.02	0	0.03	-0.01	0.02	0.01	0.03
区域 18 R_2 (微米)	15.0	15.0	15.6	15.0	15.0	20.0	20.0	20.0
区域 20 宽度 (微米)	7.0	7.0	7.3	7.0	7.0	4.0	4.0	5.0
区域 20 空隙填充, (%)	1.5	1.5	1.4	1.5	1.5	2.2	2.2	1.7
1310 纳米色散 (皮秒/纳米/千米)	-0.30	-0.54	0.02	-0.85	0.28	-1.25	-1.05	-2.19
1310 纳米斜率 (皮秒/平方纳米/千米)	0.084	0.084	0.085	0.087	0.083	0.085	0.089	0.088
零色散 (纳米)	1314	1316	1310	1320	1307	1325	1322	1335
1310 纳米 MFD (微米)	9.2	9.4	9.5	10.0	8.7	10.1	11.1	11.5
1310 纳米有效面积 (平方微米)	64.8	67.9	69.3	75.9	59.0	76.9	91.3	97.9
1550 纳米色散 (皮秒/纳米/千米)	16.4	16.3	16.8	16.7	16.5	15.8	17.0	16.0
1550 纳米斜率 (皮秒/平方纳米/千米)	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.07	0.07
1550 纳米 MFD (微米)	10.7	11.0	11.0	11.8	10.0	12.0	13.3	14.2
1550 有效面积 (平方微米)	85.2	90.5	90.9	103.5	75.5	107.3	129.9	150.3
光缆截止 (纳米)	1170	1210	1180	1225	1200	1200	1225	1230
1550 纳米衰减 (分贝/千米)	0.170	0.170	0.168	0.165	0.172	0.165	0.163	0.162

优选光纤的芯和覆层都包含碱金属氧化物掺杂剂。该碱金属氧化物优选是 K、Na、Li、Cs 或 Rb 的氧化物，或它们的混合物；更优选该碱金属氧化物是 K_2O 、 Rb_2O 、 Cs_2O 或它们的混合物；最优选该碱金属氧化物是 K_2O 。优选该碱金属氧化物在光纤芯中具有峰值浓度。该碱金属氧化物浓度可在光纤半径上径向变化，在一些情况中可随着从光纤中线沿光纤半径的至少一部分的半径增加而减小。

由上表可知，在一组优选的实施方式中，环形区域 20 的内半径约为 12-18 微米，在具体情况中与芯间隔约 8-14 微米、更优选 9-12 微米。这组实施方式导致在 1550 纳米时的有效面积大于 75 平方微米、更优选大于 90 平方微米、最优选大于 95 平方微米。这些实施例还采用宽度约为 5-10 微米、更优选约为 6-9 微米的区域 20。在第二组优选的实施方式中，环形环区域 20 与芯间隔的距离至少为 10 微米、更优选为 12 微米、最优选为 15 微米。该实施方式中的该环形环区域包括优选约为 2-8 微米、更优选约为 3-6 微米的宽度。这第二组优选实施方式显示在 1550 纳米更高的有效面积，即，大于 80 平方微米、更优选大于 100 平方微米、在大多数情况中大于 120 平方微米。本文揭示的所有光纤都显示 20 毫米直径弯曲损耗小于 1 分贝/圈、更优选小于 0.5 分贝/圈、最优选小于 0.25 分贝/圈。

下表 2 中提出根据本发明的光纤的其他实施例。在表 2 的各实施例中，在第二环形覆盖区域 20 中采用氟掺杂，在该区域中没有使用空隙，从而相对覆盖区域 18 或 22 实现明显的递减掺杂效应。表 2 提供内部芯段 14B 的最大折射率 Δ_1 ，芯段 14 的平均折射率 Δ_1 (Δ 平均值)，芯区域 14 的半径 R_1 ，第一环形覆盖区域 18 的折射率 Δ_2 ，第一环形覆盖区域 18 的外半径，第二环形覆盖区域 20 的宽度，第二环形覆盖区域 20 的外半径 R_3 ，以及第二环形覆盖区域 20 的折射率 Δ_3 。在所有这些实施例中，在芯中不使用锗，覆层在区域 18、20 和 22 中包含氟掺杂的氧化硅，没有随机分布的空隙。因此，相对于外部氟掺杂覆盖区域 22 取各段的折射率 Δ 。表 2 中还列出各实施例在 1310 纳米的色散，在 1310 纳米的色散斜率，零色散波长，在 1550 纳米的色散，在 1550 纳米的色散斜率，光缆截止波长，在 1310 纳米和 1550 纳米的模场直径，在 1310 纳米和 1550 纳米的有效面积，光缆截止波长，以及在 1550 纳米的衰减。

表 2

实施例	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
14B MAX Δ_1 , (%)	0.38	0.38	0.36	0.35	0.42	0.34	0.30	0.28	0.24	0.39	0.35	0.24
芯 14 平均 Δ_1 (%)	0.329	0.329	0.309	0.294	0.365	0.289	0.249	0.23	0.189	0.334	0.294	0.189
芯半径 R_1 (微米)	3.9	3.9	4.05	3.91	3.9	3.9	3.9	3.9	3.9	3.9	3.91	3.9
区域 18 Δ_2 , (%)	0	0.02	0	0.025	-0.01	0.02	0.01	0.03	0.03	0.005	0.025	0.03
半径 2 (微米)	15	15	15.6	15	14.98	20	20	20	20	15	15	20
区域 20 宽度 (微米)	7	7	7.3	7	7	4	4	5	5	3	3	3
半径 3 (微米)	22	22	22.9	22	21.98	24	24	25	25	18	18	23
区域 20 Δ_3 , (%)	-0.22	-0.12	-0.24	-0.26	-0.18	-0.26	-0.30	-0.37	-0.36	-0.32	-0.26	-0.46

区域 20 体积 (%-平方微米)	-57.0	-31.1	-67.5	-66.0	-47.6	-45.8	-52.8	-83.3	-81.0	-31.2	-25.2	-59.3
1310 纳米色散 (皮秒/纳米/千米)	-0.30	-0.54	0.02	-0.85	0.28	-1.25	-1.05	-2.19	-1.90	-0.29	-0.86	-1.87
1310 纳米斜率 (皮秒/平方纳米/千米)	0.084	0.084	0.085	0.087	0.083	0.085	0.089	0.088	0.094	0.084	0.087	0.094
零色散(纳米)	1314	1316	1310	1320	1307	1325	1322	1335	1330	1313	1320	1330
1310 纳米 MFD (微米)	9.2	9.4	9.5	10.0	8.7	10.1	11.1	11.5	13.2	9.2	10.0	13.2
1310 纳米有效面积 (平方微米)	64.8	67.9	69.3	75.9	59.0	76.9	91.3	97.9	129.1	64.8	75.9	129.0
1550 纳米色散 (皮秒/纳米/千米)	16.4	16.3	16.8	16.7	16.5	15.8	17.0	16.0	17.6	16.5	16.6	17.7
1550 纳米斜率 (皮秒/平方纳米/千米)	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.07	0.07	0.07	0.06	0.06	0.07
1550 纳米 MFD (微米)	10.7	11.0	11.0	11.8	10.0	12.0	13.3	14.2	16.7	10.7	11.8	16.6
1550 纳米有效面积 (平方微米)	85.2	90.5	90.9	103.5	75.5	107.3	129.9	150.3	208.1	85.1	103.6	207.3
光缆截止(纳米)	1170	1210	1180	1225	1200	1200	1225	1230	1200	1180	1226	1210
1550 纳米衰减 (分贝/千米)	0.170	0.170	0.168	0.165	0.172	0.165	0.163	0.162	0.160	0.170	0.165	0.160

由上表 2 可知, 在一些实施方式中, 环形区域 20 的内半径约为 12-18 微米, 在具体情况中与芯间隔约为 8-14 微米、更优选为 9-12 微米。这些实施方式在 1550 纳米的有效面积大于 75 平方微米、更优选大于 90 平方微米、最优选大于 95 平方微米。这些实施例还采用宽度约为 5-10 微米、更优选约为 6-9 微米的区域 20。在第二组优选的实施方式中, 环形环区域 20 与芯间隔的距离至少 10 微米、更优选 12 微米、最优选 15 微米。该实施方式中的环形环区域包括优选约为 2-8 微米、更优选约为 3-6 微米的宽度。第二组优选的实施方式显示在 1550 纳米甚至更高的有效面积, 即高于 80 平方微米、更优选高于 100 平方微米、在大多数情况下高于 120 平方微米。本文揭示的所有光纤都显示 20 毫米直径弯曲损耗小于 1 分贝/圈、更优选小于 0.5 分贝/圈、最优选小于 0.25 分贝/圈的 20 毫米直径弯曲损耗。表 2 中揭示的光纤采用的折射率 Δ 小于 -0.1%、更优选小于 -0.15%、最优选小于 -0.2%。该光纤还采用其轮廓体积绝对值 $|V_3|$ 大于 20%-平方微米、更优选大于 30%-平方微米、在一些实施方式中大于 40%-平方微米的第二环形覆盖区域。

下表 3 中列出根据本发明的光纤的其他实施例 21-29。在表 3 的各实施例中, 在第一环形覆盖区域 18 和外部覆盖区域 22 中使用氟掺杂, 在第二环形覆盖区域 20 中采用氟和/或随机分布的空隙, 从而在区域 20 中相对于覆盖区域 18 或 22 实现明显的递降掺杂效应。表 3 提供芯段 14 的平均折射率 Δ_1 (Δ 平均值), 芯区域 14 的半径 R_1 , 第一环形覆盖区域 18 的折射率 Δ_2 和外部覆盖区域

22 的折射率 Δ_4 (对于表 3 的实施例, 这两个值基本相等), 芯段 14 的 α (在本发明的优选实施方式中, α 大于 1、更优选大于 4), 第一环形覆盖区域 18 的外半径 R_2 , 第二环形区域 20 的外半径 R_3 , 第二环形区域 20 的轮廓体积 V_3 , 以及芯/覆层分配比 (R_1/R_2)。在所有实施例中, 芯中都不使用锆也不使用碱金属氧化物。相对于外部氟掺杂的覆盖区域 22 取各段的折射率 Δ 。实施例 21-25 包含氟, 在区域 20 中没有空隙。表 3 中还列出各实施例在 1310 纳米和 1550 纳米的模场直径, 在 1550 纳米的有效面积, 在 1310 纳米的色散, 在 1310 纳米的色散斜率, 零色散波长, 在 1550 纳米的色散, 在 1550 纳米的色散斜率, 在 1550 纳米的衰减, 光缆截止波长, LP11 截止波长, 10 毫米弯曲损耗, 15 毫米弯曲损耗, 以及 20 毫米弯曲损耗。

表 3

实施例	21	22	23	24	25	26	27	28	29
芯 14 平均 Δ_1 , (%)	0.38	0.31	0.31	0.36	0.38	0.27	0.3	0.38	0.39
D2=D4 (%)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
R1 (微米)	4.4	5.7	5.8	4.5	4.4	6.2	5.6	4.4	4.5
α	8.74	9.2	8.36	8.4	8.24	9.31	8.53	8.82	8.43
D2 (%)	-0.34	-0.44	-0.2	-0.19	-0.21	-1.2	-1.2	-1.2	-1.2
R2 (微米)	15.0	18.1	18.3	14.4	14.5	19.0	17.5	16.1	14.7
R3 (微米)	19.4	22.0	25.6	19.0	22.1	21.7	20.5	18.4	16.9
区域 20 体积 (%-平方微米)	-52.0	-68.8	-63.1	-32.3	-59.4	-128.5	-140.1	-93.5	-81.2
R1/R2	0.297	0.313	0.318	0.31	0.306	0.323	0.319	0.269	0.302
1310 纳米 MFD (微米)	8.74	10.22	10.27	8.9	8.68	10.98	10.19	8.67	8.63
1550 纳米 MFD (微米)	9.94	11.38	11.40	10.17	9.88	12.19	11.40	9.90	9.79
1550 纳米有效面积 (平方微米)	75.2	101.0	101.5	78.4	74.2	116.2	100.6	74.4	73.1
1310 纳米色散 (皮秒/纳米/千米)	-0.42	1.87	2.02	-0.57	-0.55	2.22	1.58	-0.76	-0.31
1310 纳米斜率 (皮秒/平方纳米/千米)	0.086	0.089	0.089	0.086	0.086	0.090	0.089	0.085	0.086
零色散 (纳米)	1315	1289	1287	1317	1316	1285	1292	1319	1314
1550 纳米色散 (皮秒/纳米/千米)	16.3	19.2	19.4	16.2	16.2	19.8	18.9	15.9	16.5
1550 纳米斜率 (皮秒/平方纳米/千米)	0.059	0.060	0.060	0.059	0.058	0.061	0.061	0.059	0.059
1550 纳米衰减 (分贝/千米)	0.173	0.169	0.168	0.172	0.173	0.167	0.169	0.173	0.173
光缆截止 (纳米)	1230	1395	1420	1189	1254	1446	1375	1226	1259
LP11 截止 (纳米)	1270	1462	1500	1267	1260	1486	1405	1247	1286
10 毫米弯曲损耗 (分贝/圈)	0.31	0.53	0.42	0.76	0.24	0.95	0.30	0.30	0.23
15 毫米弯曲损耗 (分贝/圈)	0.12	0.21	0.16	0.30	0.09	0.37	0.12	0.11	0.09
20 毫米弯曲损耗 (分贝/圈)	0.002	0.003	0.002	0.004	0.001	0.005	0.002	0.002	0.001

由上表 3 可知, 在一些实施方式中, 环形区域 20 与芯间隔约为 8-14 微米、更优选 9-13 微米, 在一些实施方式中为 9-12 微米。这些实施方式在 1550 纳米的有效面积大于约 70 平方微米、更优选大于 90 平方微米、在一些实施方式中大于 95 平方微米的有效面积。这些实施例还采用宽度约为 4-10 微米、更优选约为 6-9 微米的区域 20。本文所揭示的所有光纤都显示 20 毫米直径弯曲损耗小于 1 分贝/圈、更优选小于 0.5 分贝/圈、最优选小于 0.25 分贝/圈。表 3 中揭示的光纤包括采用小于 1% 的有效折射率 Δ 的第二环形区域 20 (该区域采用氧化硅玻璃, 其中包含平均空隙直径为 200 纳米的随机分布的空隙), 其中实施例 26-29 中的区域 20 为 -1.20% 有效折射率 Δ 。这些光纤还采用轮廓体积绝对值 $|V_3|$ 大于 20%-平方微米、更优选大于 30%-平方微米的第二环形覆盖区域, 在一些实施方式中大于 40%-平方微米, 在一些实施方式中 $|V_3|$ 大于 60、80 或甚至 100%-平方微米。

在拉制过程期间可有益地控制碱金属氧化物的扩散。已经发现, 通过以指定方式改变拉制条件, 可使碱金属氧化物掺杂剂以要求的浓度曲线分布在整个预制品中。优选以对半径成线性关系的方式使碱金属氧化物掺杂剂扩散。由于碱金属氧化物掺杂剂的扩散部分地取决于所掺杂玻璃的温度、玻璃保持在该温度的时间, 所以, 同样的因素在拉制过程期间控制碱金属氧化物扩散中发挥显著作用。通过改变拉制速度、拉制(炉)温度和光纤张力, 控制拉制过程期间光纤预制品(以及由该预制品拉制的光纤)经历的时间和温度。例如, 增加拉制速度使光纤预制品的特定部分在拉制炉中的停留时间缩短, 从而缩短碱金属氧化物掺杂剂在光纤预制品上扩散的距离, 由此缩短其在所拉制光纤上扩散的距离。这可导致有较少的碱金属氧化物扩散进覆层中, 从而在光纤芯中有较高的碱金属氧化物浓度。相反, 降低拉制速度增加了停留时间, 从而可导致降低光纤芯中碱金属氧化物的浓度, 因为碱金属氧化物进一步扩散到光纤的覆层中。以类似的方式, 提高炉温度会增加碱金属氧化物的扩散速率, 降低碱金属氧化物的浓度。因此, 可有效利用拉制速度和炉温度来控制扩散, 从而控制得到的光纤内的碱金属氧化物的分布。

参考图 2, 图示常规外部气相沉积方法, 使用烟灰燃烧器(soot burner) 156 在心轴 144 上沉积多层氧化硅烟灰(silica soot) 162 从而形成烟灰预制品 160。然后使用标准氯干燥技术干燥得到的烟灰预制品。然后通过足以致去除许多或全部自干燥步骤残留的氯的温度和时间条件下将烟灰暴露于含氟化合物

(如 SiF_4) 的气氛中, 用氟对烟灰进行掺杂。优选在小于约 1100°C 的温度下暴露于含氟气氛(氟清扫), 以避免用高水平氟掺杂玻璃。低水平的氟掺杂是有利的, 即例如 0.1-0.4 重量%的氟。然后使得到的氟(和可能的氯)掺杂的烟灰管固结。

然后对固结的玻璃管进行碱金属掺杂。例如, 参见图 3, 优选首先将得到的玻璃管 106 安装在车床 101 中的卡盘之间(例如玻璃加工车床或常规改进的化学气相沉积(MCVD)玻璃成形车床)。通过在管 106 的壁中由火焰加工锻造两个环形颈状变形物 112, 在靠近管 106 一端处形成用于接受碱金属来源化合物 110 的优选环形储器 108, 或者用其他方法将该储器焊接至该管。还可使用其他类型的储器。优选环形颈状变形物 112 彼此之间距离约为 2 厘米。较好地, 为了防止碱金属结晶, 要求管 106 以及在管 106 内侧设置的任何附加玻璃都是基本无氯的。“基本无氯”表示其氯含量低到足以避免因为碱金属氯化物结晶而导致的光损耗。为此目的要求氯含量优选小于约 500 重量 ppm; 更优选小于约 100 重量 ppm; 更优选小于约 50 重量 ppm。另外, 氧化硅玻璃管 106 以及其中设置的任何附加玻璃应当基本无“水”。“水”表示羟基 OH。水应对 1383 纳米或附近的吸收峰负责, 该吸收峰可能延伸至光纤的工作波长区域中。该峰可能对光纤衰减产生有害作用。因此, 要求通过尽可能多地减少玻璃的 OH 含量来减小该吸收峰, 也称为水峰。优选玻璃管 106 包含小于约 100 重量 ppb 的 OH; 更优选小于约 20 重量 ppb。要确保原料玻璃制品在扩散碱金属氧化物掺杂剂之前是基本无水的, 可在氧化硅玻璃管的制造期间采用常规氯干燥技术。

参见图 3, 将碱金属来源化合物 110 引入储器 108 的管 106 中, 在管 106 旋转时用热源 114 加热形成蒸气。使氧或载气通过旋转密封物 118 流进管 106 的进口 116 中, 加热碱金属氧化物来源化合物 110 下游的管 106 的部分 120, 以便使碱金属氧化物扩散进管 106 的内表面 122 中。优选该管 106 中没有插入任何预制品组件, 例如另一个玻璃棒或类似物。应当将碱金属氧化物来源化合物 110 下游的管 106 的部分 120 加热至足以促进碱金属快速扩散进入表面 122 中并防止玻璃失透的温度。较好地, 通过热源 124 将碱金属氧化物来源化合物 110 下游的管 106 的部分 120 加热至 1500°C 以上; 更优选约为 $1500-2000^\circ\text{C}$ 。优选使热源 124 沿着管 106 的部分 120 的长度行进。碱金属氧化物来源化合物 112 优选包含选自 K、Na、Li、Cs 和 Rb 的元素。优选碱金属氧化物来源化合物 110 是溴化物、碘化物或氟化物。最优选碱金属氧化物来源化合物 110 是 KBr、KI 或 KNO_3 。优选在管 106 破裂之前, 使碱金属氧化物(例如 K_2O 、 Na_2O 、 Li_2O 、

Rb₂O、Cs₂O 及其混合物)扩散至自管 106 的内侧扩散表面 122 始的约 100-500 微米的深度,从而形成碱金属氧化物掺杂的玻璃管。具体地说,优选该管中扩散的碱金属氧化物掺杂剂浓度(重量%)是径向变化。优选对玻璃制品(例如管 106)进行掺杂,使该浓度在内一半部分 107 为最高,在外一半部分 109 为较低,如图 3 的放大视图所示。内半部分和外半部分之间的分界点由管 106 的径向厚度限定,并位于该厚度一半处(如虚线 111 所示)。例如,这种扩散优选使得外半部分 109 中的碱金属掺杂剂的峰值浓度小于内半部分 107 的峰值浓度(重量%)的 50%。

扩散过程之后可进行进一步加热管 106 的步骤,从而促使管 106 通过常规方法如本领域已知的方法(或者通过本文所述的干燥方法)发生部分破裂,以减少可能由此损耗碱金属氧化物的内侧表面面积并加厚碱金属氧化物已经扩散到的玻璃层。然后用热源 124 加热氧化硅玻璃管 106,使碱金属氧化物来源化合物 110 下游的管 106 破裂,并形成碱金属氧化物掺杂的固体玻璃棒 132。按照本领域已知的常规方法实现管 106 的破裂,例如用合适热源(如火炬)加热。然后从包括碱金属来源化合物储槽 108 的那部分玻璃切割固体碱金属掺杂的玻璃棒 132。

应当认识到,破裂时,碱金属掺杂的玻璃棒 132 优选包含(类似于管 106)可径向变化的碱金属氧化物浓度,使得对应于内半部分 107 的部分具有最高的碱金属掺杂剂峰值浓度(重量%),对应于外半部分 109 的部分具有较低的峰值浓度。最优选碱金属掺杂剂的峰值浓度位于棒的中央,半径一半处的浓度小于峰值浓度的 50%;更优选小于 25%。

可在再拉制炉 136 中加热掺杂的玻璃棒 132,拉制成更小直径的玻璃棒 144。这个再拉制过程如图 5 中所示。将玻璃柄 130 连接至由上述破裂阶段得到的碱金属掺杂的玻璃棒 132,将碱金属掺杂的玻璃棒 132 安装在常规再拉制炉 136 上方的移动式向下进料支架 134 中。通过马达驱动的牵引机 140 牵拉可连接至碱金属掺杂的玻璃棒 132 底部的牺牲玻璃棒 138,从而以合适速率拉制碱金属掺杂的玻璃棒 132。已经发现 15-23 厘米/分钟的速率是足够的,该速率较大程度根据传感器 142 测得的直径而控制。由拉制过程得到的小直径玻璃棒 144 的外直径(d1)优选为 3-10 毫米;更优选直径小于 6 毫米。与拉制光纤时要求的光纤芯中的峰值 K₂O 浓度相比,小直径玻璃棒 144 的峰值 K₂O 浓度应当约为其 5-10 倍,以补偿光纤拉制期间碱金属掺杂剂的明显迁移。例如,如果光

纤芯中的峰值 K_2O 浓度要求为 0.4 重量%，则小直径玻璃棒 144 优选应当具有约 2-4 重量%的峰值 K_2O 浓度。具体地说，具有非常小的直径的碱金属掺杂的玻璃棒是有益的，因为这使玻璃棒中存在的过渡金属杂质浓缩在非常靠近光纤中线的位置，在该位置它们的负面影响最小。应当认识到，对于向掺杂的覆层添加的大量材料，光纤中的峰值浓度可能比小直径玻璃棒中的峰值浓度小 100 倍。形成之后立刻对小直径玻璃棒 144 进行进一步的包覆。

例如，图 4 中所示的小直径碱金属掺杂的玻璃棒 144 可用作原料棒，可使用图 1 中所示的 OVD 方法在其上沉积附加的多孔玻璃烟灰 162 作为包覆，从而形成光纤预制品。可在附加的烟灰沉积之前将玻璃柄连接至碱金属掺杂的玻璃棒 144，该柄成为制得的预制品的整合部分。该柄提供在随后加工步骤期间对由沉积过程得到的氧化硅玻璃预制品进行支撑的方法。具有连接的柄的玻璃棒 144 可装配在车床中，该玻璃棒可相对于燃烧器旋转和平移。然后通过使玻璃棒 144 相对于燃烧器 156 多次行进以构建多个含氧化硅烟灰的层，从而形成外部烟灰涂层，来形成复合烟灰预制品。平移动作也可通过沿着旋转的玻璃棒 144 来回移动燃烧器 156 或者通过燃烧器 156 和玻璃棒 144 的组合平移动作来实现。外部烟灰涂层至少形成复合预制品 160 的一部分芯玻璃，该芯玻璃优选基本由纯氧化硅构成。优选该烟灰涂层的密度大于 0.35 克/立方厘米、更优选约为 0.35-0.5 克/立方厘米。然后通过将复合预制品 160 暴露于含氟气体中同时在约 1000℃ 的炉中加热对其进行干燥。然后对该预制品 160 进行氟掺杂。在氟掺杂步骤期间，优选通过在适合于用氟掺杂烟灰的温度下(例如约 1000℃)将该预制品暴露于含氟气体中从而对该预制品 160 进行氟掺杂。以这种方式，形成该光纤的外部芯区域。但是，例如只进行足以允许使用较少量氟(0.1-0.4 重量%)的长时间氟掺杂步骤。然后通过将该预制品 160 加热至固结预制品的合适温度，对预制品进行固结。然后可以对得到的透明玻璃芯预制品进行再拉制，形成第二芯棒，即包含至少一部分由其拉制的光纤芯的玻璃棒。然后可通过以下方式添加额外的玻璃进一步加工该第二芯棒：用玻璃管(玻璃管或烟灰管)装套，通过化学气相沉积法沉积玻璃烟灰，例如既装套管又进行化学沉积，或者通过本领域中已知的其他方法；从而易于供拉制成光纤的完整光纤预制品。额外的玻璃可包括芯玻璃和/或覆层玻璃。另外，额外的玻璃可采用若干额外的沉积步骤以实现所需的厚度，其中在各步骤之后，进行烟灰干燥、氟掺杂、固结、并再拉制成较小直径的棒。环形覆盖区域 18(优选与芯相邻的覆盖区域)以及环形

覆盖区域 22 都是优选通过溢流方式用氟掺杂(见 US4629485)进行递降掺杂的氧化硅,从而形成光纤的递降掺杂的覆盖区域。这种掺杂可优选足以在芯和覆层之间实现例如大于 0.2%、更优选 0.30-0.40%的相对折射率 Δ %。具体地说,对于通过向第二棒沉积而添加深沟(moat)氧化硅(对应于光纤覆层的额外的玻璃)的各附加步骤,这些深沟氧化硅掺杂有氟。首先通过使深沟烟灰经历含氯气体干燥,然后使其在 1225°C 与含氟气体(例如 SiF_4 或 CF_4)接触 60-120 分钟,随后优选在含氟气体存在下以 7-10 毫米/分钟向下通过热区(1450-1500°C)而固结。可再拉制这个预制品以形成第三棒并再次重复这些步骤,即沉积、干燥、氟掺杂和固结,直到实现合适的最终预制品直径。以及使用氟掺杂技术形成区域 20,或者优选使用固结技术(如上所述)形成区域 20,固结技术在区域 20 中形成随机分布的空隙,所述空隙在区域 20 中用作强递降掺杂剂。制造完整的光纤预制品之后,可将完整的光纤拉制预制品拉制成碱金属氧化物掺杂的光纤。

在本文揭示的所有实施方式中,光纤优选包括包围覆层最外直径并与其直接接触的主要涂层、以及包围该主要涂层并与其直接接触的次要涂层。

对本领域技术人员显而易见的是,可以在不偏离本发明原理和范围的情况下对本发明进行各种修改和变化。本发明意在覆盖落在所附权利要求及其等同项的范围之内的所有这些对本发明的修改和变化。

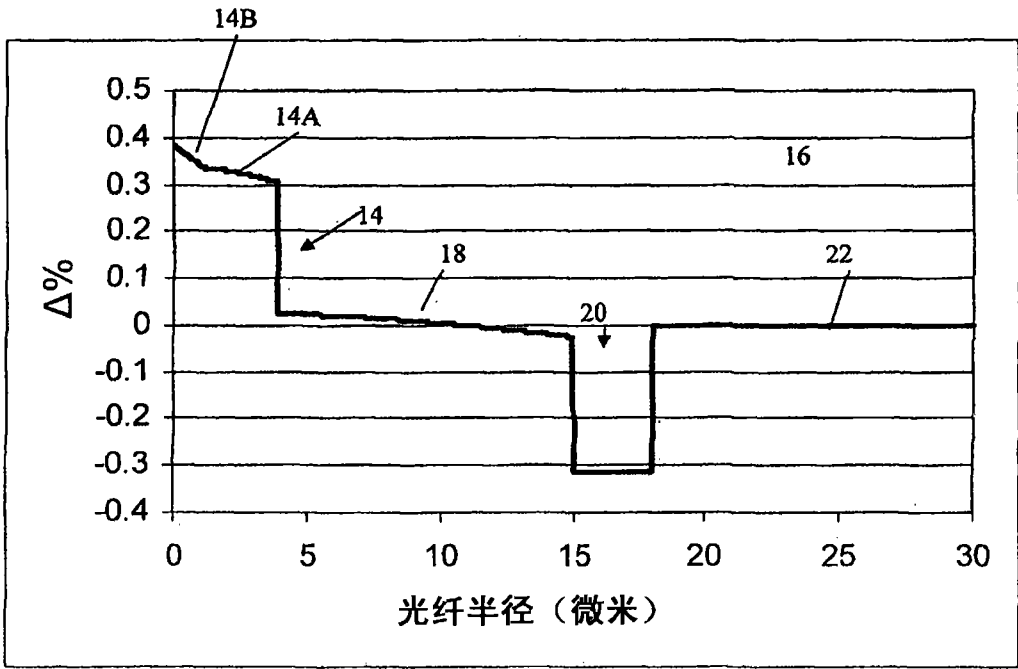


图 1

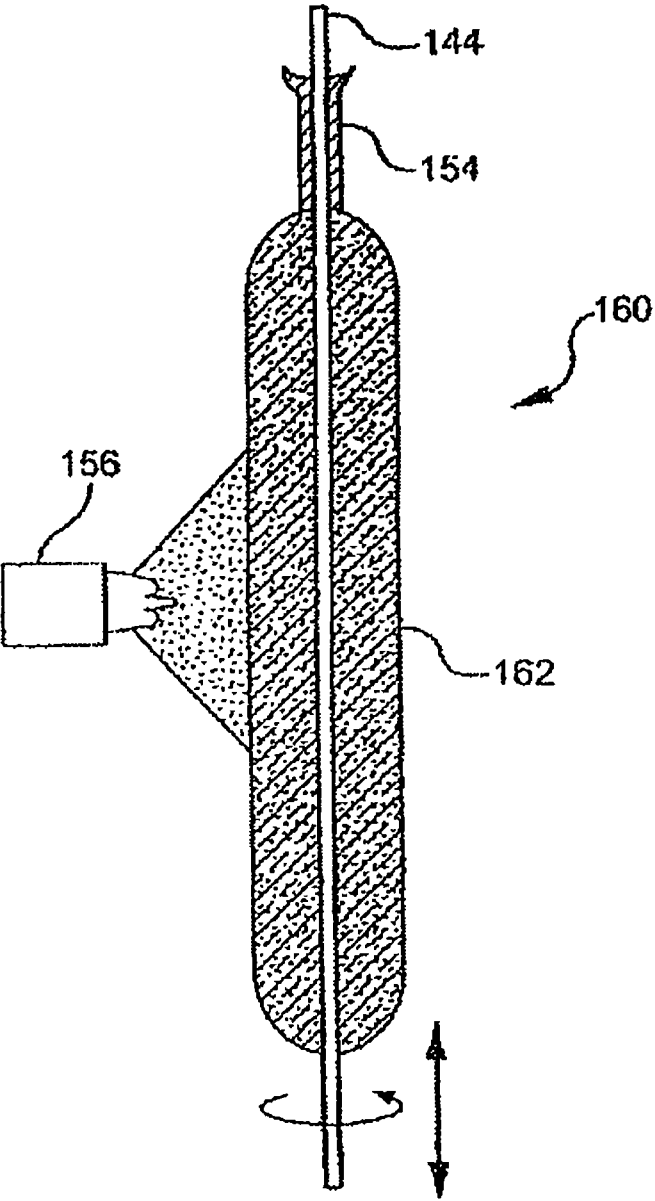


图 2

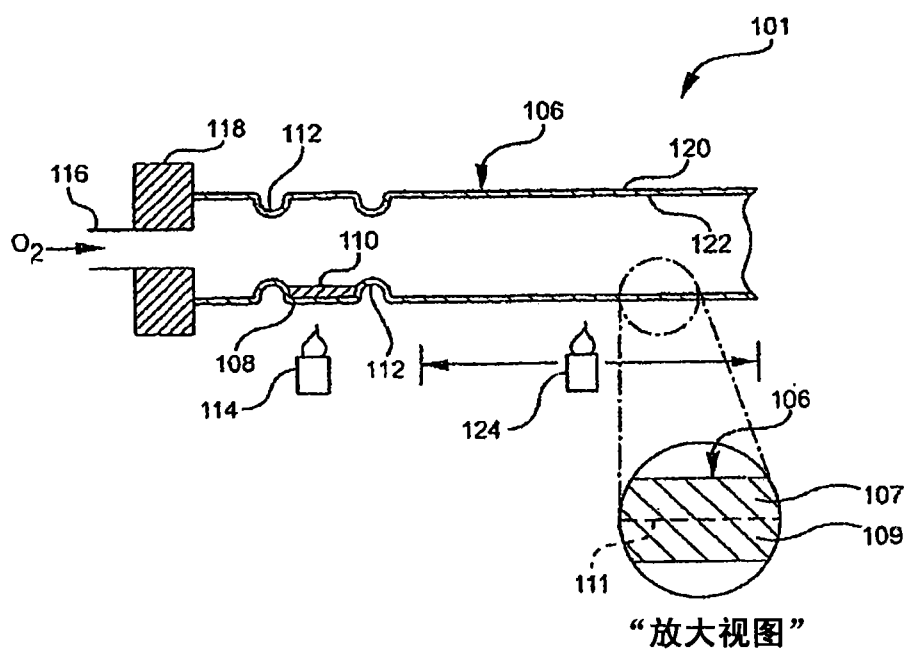


图 3

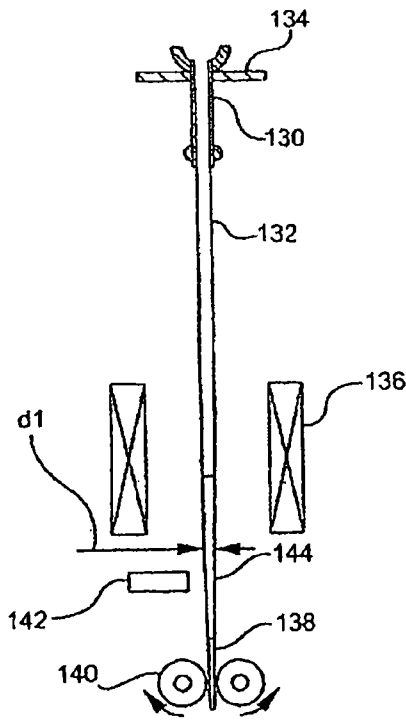


图 4