



(21) 申請案號：106136876 (22) 申請日：中華民國 106 (2017) 年 10 月 26 日

(51) Int. Cl. : G02B6/02 (2006.01)

(30) 優先權：2016/10/27 美國 62/413,605

(71) 申請人：美商康寧公司 (美國) CORNING INCORPORATED (US)  
美國

(72) 發明人：貝耐特 凱文華勒斯 BENNETT, KEVIN WALLACE (US)；布克拜得 德納克雷格 BOOKBINDER, DANA CRAIG (US)；巴特 道格拉斯盧埃林 BUTLER, DOUGLAS LLEWELLYN (US)；李明軍 LI, MING-JUN (US)；坦登 普什卡 TANDON, PUSHKAR (US)

(74) 代理人：李世章；彭國洋

申請實體審查：無 申請專利範圍項數：15 項 圖式數：4 共 46 頁

(54) 名稱

低彎損失的單模光纖

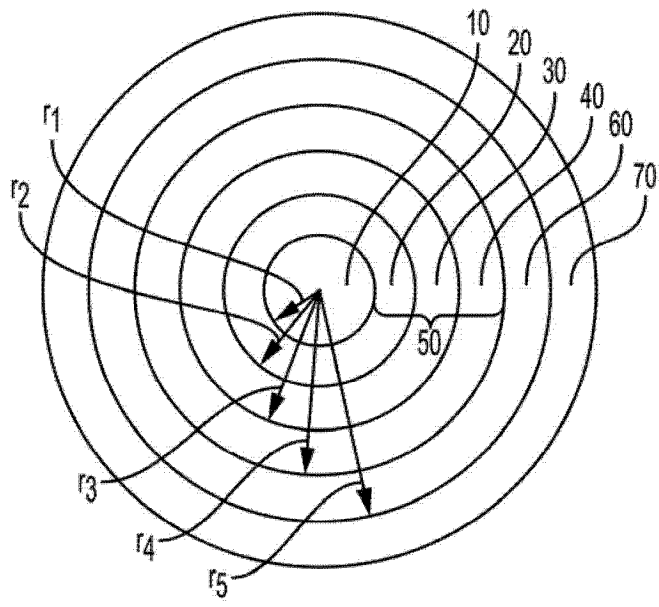
LOW BEND LOSS SINGLE MODE OPTICAL FIBER

(57) 摘要

一種光纖，包括：(i) 一纖芯區域，其包括一外半徑  $r_1$  與一相對折射指數  $\Delta_{1max}$ ，而  $3.0 \mu m < r_1 < 7.0 \mu m$  且  $0.32\% < \Delta_{1max} < 0.5\%$ ；(b) 圍繞該纖芯區域的一凹陷指數包層區域，其包括一外半徑  $r_3$  與一小於  $-0.2\%$  的相對折射指數  $\Delta_3$  以及一凹溝體積  $V_3$ ，其中  $45\% \Delta_{1max} - \mu m^2 < |V_3| < 200\% \Delta_{1max} - \mu m^2$ ；(c) 一第一外包層區域，其圍繞該凹陷指數包層區域並包括一相對折射指數  $\Delta_4$  與一外半徑  $r_4$ ；及 (d) 一第二外包層，其包括  $5wt\% - 20wt\%$  的二氧化鈦、一相對折射指數  $\Delta_5$ 、一厚度  $T_M$  以及一外半徑  $r_5$ ，其中  $3 \mu m < T_M < 30 \mu m$  且  $r_5 < 65 \mu m$ ；該光纖具有一模場直徑  $MFD_{1550}$ ，且  $8 \mu m < MFD_{1550} < 10.5 \mu m$ ，該光纖也具有在繞著  $2.5mm$  半徑心軸彎曲一圈時  $< 1550nm$  的截止波長，以及當使用  $2.5mm$  半徑心軸在  $1550nm$  下  $\leq 1.0dB/turn$  的彎損。

An optical fiber comprising: (i) a core region comprising an outer radius  $r_1$ , and  $3.0 \mu m < r_1 < 7.0 \mu m$  and a relative refractive index  $\Delta_{1max}$  and  $0.32\% < \Delta_{1max} < 0.5\%$ ; (b) a depressed index cladding region surrounding the core region comprising an outer radius  $r_3$  and a relative refractive index  $\Delta_3$  less than  $-0.2\%$ , and trench volume  $V_3$  wherein  $45\% \Delta_{1max} - \mu m^2 < |V_3| < 200\% \Delta_{1max} - \mu m^2$ ; (c) a first outer cladding region surrounding the depressed index cladding region and comprising a relative refractive index  $\Delta_4$  and an outer radius  $r_4$ ; and (d) a second outer cladding layer comprising  $5wt\% - 20wt\%$  titania, a relative refractive index  $\Delta_5$ , and a thickness  $T_M$ , wherein  $3 \mu m < T_M < 30 \mu m$ , and outer radius  $r_5 < 65 \mu m$ ; the optical fiber has a mode field diameter  $MFD_{1550}$  and  $8 \mu m < MFD_{1550} < 10.5 \mu m$ , a cutoff wavelength  $< 1550nm$  when bent 1 turn around a  $2.5mm$  radius mandrel, and a bending loss at  $1550nm$  when using a mandrel comprising a radius of  $2.5mm$  of  $\leq 1.0dB/turn$ .

指定代表圖：



符號簡單說明：

- 10 . . . 纖芯區域
- 20 . . . 內包層區域
- 30 . . . 凹陷包層區域
- 40 . . . 外包層區域
- 50 . . . 包層區域
- 60 . . . 外包層
- 70 . . . 塗層

圖2A

## 【發明說明書】

【中文發明名稱】低彎損失的單模光纖

【英文發明名稱】LOW BEND LOSS SINGLE MODE OPTICAL FIBER

【技術領域】

【0001】 相關申請之交叉參照：本申請案基於專利法，主張於2016年10月27日所申請之美國臨時申請序列號62/413,605之優先權，其內容受本申請案所倚賴並於此併入本文做為參考。

【0002】 本發明與具有低彎損失並適合與矽光子裝置一起使用的光纖有關。

【先前技術】

【0003】 更大帶寬以及更高資料傳輸指數的需求，已經促成發展用於資訊儲存與傳遞之下一代平台的努力動機。已被廣泛的相信，光學資訊系統與目前的基於微電子的系統相比之下，將提供更優越的效能。以矽光子為基礎的整合光學系統為微電子系統的領先取代技術。矽光子與標準互補式金氧半場效電晶體（CMOS）技術及波長分波多工（WDM）介接，用以將電子訊號轉換為光學訊號、用以傳輸光學訊號，並用以將光學訊號再轉換為電子訊號。在解集系統中，在單元之間的訊號轉移於透過光學鏈路發生，其提供高帶寬以及高資料傳輸指數。

【0004】 解集架構的資料中心已經被提出做為未來的資料中心，其與矽光子與波長分波多工技術的使用有關。

儘管許多這些系統已經聚焦在多模光纖，但也考慮使用單模光纖的系統架構。

【0005】 因此，對於所述資料中心應用與類似的應用而言，需要一種適宜的光纖。

【發明內容】

【0006】 於此揭示的為光學波導光纖，其包括：

一纖芯區域，其包括一外半徑  $r_1$  與一相對折射指數  $\Delta_{1\max}$ ，而  $3.0 \leq r_1 \leq 7.0 \mu\text{m}$  且  $0.32\% \leq \Delta_{1\max} \leq 0.5\%$ ；

圍繞該纖芯區域的一凹陷指數包層區域，該凹陷指數包層區域包括一外半徑  $r_3$  與一小於  $-0.2\%$  的相對折射指數  $\Delta_3$  以及一凹溝體積  $V_3$ ，該凹溝體積  $V_3$  的絕對體積如  $45\% \Delta - \mu\text{m}^2 \leq |V_3| \leq 200\% \Delta - \mu\text{m}^2$ ；

圍繞該凹陷指數包層區域的一第一外包層區域，該第一外包層區域包括一相對折射指數  $\Delta_4$  與一外半徑  $r_4$ ；及

具有一相對折射指數  $\Delta_5$  的一第二外包層，所述第二外包層包括利用  $5\text{wt}\% - 20\text{wt}\%$  的二氧化鈦所摻雜的二氧化矽基玻璃，並具有一厚度  $T_M$ ，因此  $2 \mu\text{m} \leq T_M \leq 30 \mu\text{m}$ ，該第二外包層也具有不大於  $65 \mu\text{m}$  的外半徑  $r_5$ ；

其中該光纖在  $1550\text{nm}$  下的模場直徑 ( $\text{MFD}_{1550}$ )，且  $8.3 \mu\text{m} \leq \text{MFD}_{1550} \leq 10.5 \mu\text{m}$ ，該光纖具有在繞著  $2.5\text{mm}$  半徑心軸彎曲一圈時  $< 1550\text{nm}$  的單模截止波長，在  $1550\text{nm}$  下至少

$65\ \mu\text{m}^2$  並小於  $85\ \mu\text{m}^2$  的有效面積，以及當使用  $2.5\ \text{mm}$  半徑心軸進行心軸纏繞測試時，在  $1550\ \text{nm}$  下決定為  $\leq 1.0\ \text{dB/turn}$  的彎損。

【0007】根據於此揭示之該光纖的至少某些示例具體實施例，當該光纖繞著  $2.5\ \text{mm}$  半徑心軸彎曲一圈時，該單模截止波長戲界於  $1100\ \text{nm}$  及  $1450\ \text{nm}$  之間。根據於此揭示之至少某些示例具體實施例， $60\% \Delta - \mu\text{m}^2 \leq |V_3| \leq 200\% \Delta - \mu\text{m}^2$ 。

【0008】根據於此揭示之至少某些示例具體實施例，在使用  $2.5\ \text{mm}$  半徑心軸進行心軸纏繞測試時，在  $1550\ \text{nm}$  下該光纖顯現的彎損決定為  $\leq 0.55\ \text{dB/turn}$ ，而在某些具體實施例中為  $\leq 0.4\ \text{dB/turn}$ ，在某些具體實施例中為  $\leq 0.2\ \text{dB/turn}$ ，例如  $\leq 0.1\ \text{dB/turn}$ ，或甚至  $\leq 0.01\ \text{dB/turn}$ 。

【0009】根據於此揭示之至少某些示例具體實施例，該光纖纖芯區域的外半徑  $r_1$  為  $3.0 \leq r_1 \leq 6$ ，而該凹溝體積  $V_3$  則像是  $70\% \Delta - \mu\text{m}^2 \leq |V_3| \leq 150\% \Delta - \mu\text{m}^2$ 。

【0010】根據至少某些示例具體實施例， $80\% \Delta - \mu\text{m}^2 \leq |V_3| \leq 200\% \Delta - \mu\text{m}^2$ ，而在某些具體實施例中， $100\% \Delta - \mu\text{m}^2 \leq |V_3| \leq 150\% \Delta - \mu\text{m}^2$ 。根據至少某些示例具體實施例， $60\% \Delta - \mu\text{m}^2 \leq |V_3| \leq 140\% \Delta - \mu\text{m}^2$ ，而在某些具體實施例中， $70\% \Delta - \mu\text{m}^2 \leq |V_3| \leq 140\% \Delta - \mu\text{m}^2$ 。在某些具體實施例中， $80\% \Delta - \mu\text{m}^2 \leq |V_3| \leq 140\% \Delta - \mu\text{m}^2$ 。

【0011】 根據至少某些示例具體實施例， $10\ \mu\text{m} \leq r_5 \leq 63\ \mu\text{m}$ ，舉例而言， $30\ \mu\text{m} \leq r_5 \leq 63\ \mu\text{m}$  或  $30\ \mu\text{m} \leq r_5 \leq 62.5\ \mu\text{m}$ ，而在某些具體實施例中， $30\ \mu\text{m} \leq r_5 \leq 50\ \mu\text{m}$ 。根據至少某些示例具體實施例， $40\ \mu\text{m} \leq r_5 \leq 62.5\ \mu\text{m}$ 。舉例而言，在某些示例具體實施例中，該第二外包層的外半徑  $r_5$  為 62.5、60、55、50、42、41.7、35、31.25 或  $30\ \mu\text{m}$ 。

【0012】 根據至少某些示例具體實施例，該光纖具有在繞著 2.5 mm 半徑心軸彎曲一圈時  $< 1550\ \text{nm}$  的光纖截止波長，在  $1550\ \text{nm}$  下至少  $65\ \mu\text{m}^2$  並小於  $85\ \mu\text{m}^2$  的有效面積，以及當使用 2.5 mm 半徑心軸進行心軸纏繞測試時，在  $1550\ \text{nm}$  下決定為  $\leq 1.0\ \text{dB/turn}$  的彎損。

【0013】 根據至少某些示例具體實施例，該光纖具有小於  $1550\ \text{nm}$  的 22 m 纜線截止波長。根據至少某些示例具體實施例，該光纖具有小於  $1300\ \text{nm}$  的 22 m 纜線截止波長，舉例而言介於  $1000\ \text{nm}$  與  $1350\ \text{nm}$  之間，舉例而言介於  $1000\ \text{nm}$  與  $1300\ \text{nm}$  之間。根據至少某些示例具體實施例，該光纖具有介於  $1200\ \text{nm}$  與  $1550\ \text{nm}$  之間的 22 m 纜線截止波長，舉例而言，介於  $1200\ \text{nm}$  與  $1350\ \text{nm}$  之間。

【0014】 根據至少某些示例具體實施例，該光纖第二外包層包括 5 到 15 wt% 的二氧化鈦，且  $3\ \mu\text{m} \leq T_M \leq 15\ \mu\text{m}$ 。

【0015】 在某些示例具體實施例中， $2\ \mu\text{m} \leq T_M \leq 20\ \mu\text{m}$ 。在某些示例具體實施例中， $2\ \mu\text{m} \leq T_M \leq 15\ \mu\text{m}$ 。在某些示例具體實施例中，

$3\ \mu\text{m} \leq T_M \leq 15\ \mu\text{m}$ 。在某些示例具體實施例中， $2\ \mu\text{m} \leq T_M \leq 10\ \mu\text{m}$ 。在某些示例具體實施例中， $2\ \mu\text{m} \leq T_M \leq 5\ \mu\text{m}$ 。

【0016】 在某些具體實施例中，在 $1550\ \text{nm}$ 的模場直徑（ $\text{MFD}_{1550}$ ）為 $9\ \mu\text{m} \leq \text{MFD}_{1550} \leq 10\ \mu\text{m}$ 。在某些具體實施例中，在 $1550\ \text{nm}$ 的模場直徑（ $\text{MFD}_{1550}$ ）為 $9.5\ \mu\text{m} \leq \text{MFD}_{1550} \leq 10.3\ \mu\text{m}$ 。

【0017】 在某些具體實施例中，該凹陷指數包層區域的相對折射指數 $\Delta_3$ 為 $-0.2\% \leq \Delta_3 \leq -0.7\%$ ，而在某些具體實施例中為 $-0.3\% \leq \Delta_3 \leq -0.5\%$ 。

【0018】 根據於此敘述之實例，該纖芯區域包括 $\alpha$ ，而 $10 \leq \alpha \leq 100$ 。然而在某些示例具體實施例中， $1 \leq \alpha \leq 10$ 。

【0019】 根據於此揭示之至少某些示例具體實施例，該光纖包含一塗層，其圍繞該第二外包層，該塗層包括：具有楊氏模數為 $0.1$ 至 $1\ \text{MPa}$ 的一次被覆層P；以及具有楊氏模數為 $1100$ 至 $2500\ \text{MPa}$ 的次級被覆層S，其中該次級被覆層具有不大於 $260\ \mu\text{m}$ 的外塗層直徑，在某些具體實施例中不大於 $250\ \text{nm}$ ，而在某些具體實施例中不大於 $242\ \mu\text{m}$ ，舉例而言小於 $210\ \mu\text{m}$ 。

【0020】 根據至少某些示例具體實施例，一種微光學裝置，其包括：

a. 一矽光子晶片；

b. 一光纖，該光纖具有被彎曲成 $\leq 5\ \text{mm}$ 之彎曲半徑的部分；該光纖包括：

一纖芯區域，其包括範圍從  $3.0$  至  $7.0 \mu\text{m}$  的一外半徑  $r_1$  與範圍從  $0.32\%$  至  $0.5\%$  的一相對折射指數  $\Delta_{1\text{max}}$ ；

圍繞該纖芯區域的一凹陷指數包層區域，該凹陷指數包層區域包括一外半徑  $r_3$  與一小於  $-0.2\%$  的相對折射指數  $\Delta_3$  以及一凹溝體積  $V_3$ ，因此  $45\% \Delta - \mu\text{m}^2 \leq |V_3| \leq 200\% \Delta - \mu\text{m}^2$ ；

圍繞該凹陷指數包層區域的一第一外包層區域，該第一外包層區域包括一相對折射指數  $\Delta_4$  與一外半徑  $r_4$ ；及

具有一相對折射指數  $\Delta_5$  的一第二外包層，該第二外包層包括利用  $5\text{wt}\% - 20\text{wt}\%$  的二氧化鈦所摻雜的二氧化矽基玻璃，並具有一厚度  $T_M$ ，因此  $3 \mu\text{m} \leq T_M \leq 30 \mu\text{m}$ ，該第二外包層也具有不大於  $65 \mu\text{m}$  的外半徑  $r_5$ ；

其中該光纖在  $1550\text{nm}$  下的模場直徑 ( $\text{MFD}_{1550}$ ) 為  $8.3 \mu\text{m} \leq \text{MFD}_{1550} \leq 10.5 \mu\text{m}$ ，該光纖具有在繞著  $2.5\text{mm}$  半徑心軸彎曲一圈時  $< 1550\text{nm}$  的單模截止波長，在  $1550\text{nm}$  下為至少  $65 \mu\text{m}^2$  並小於  $85 \mu\text{m}^2$  的有效面積，以及當使用  $2.5\text{mm}$  半徑心軸進行心軸纏繞測試時，在  $1550\text{nm}$  下決定為  $\leq 1.0\text{dB/turn}$  的彎損。

**【0021】** 在某些具體實施例中，該光纖具有被彎曲成彎曲半徑  $r_b$  不大於  $3\text{mm}$  的部分，舉例而言為  $0.5\text{mm}$  至

2.5 mm。在某些具體實施例中，該彎曲半徑  $r_b$  為  $2.5\text{ mm} \geq r_b \geq 1\text{ mm}$ ，而在某些具體實施例中， $2.5\text{ mm} \geq r_b \geq 1.5\text{ mm}$ 。

【0022】 在某些具體實施例中，該光纖具有被彎曲成彎曲半徑  $\leq 2.5\text{ mm}$  的部分，在  $1550\text{ nm}$  下該光纖顯現的彎損利用包括半徑為  $2.5\text{ mm}$  之心軸進行之心軸纏繞測試係被決定為  $\leq 0.55\text{ dB/turn}$ ，而在某些具體實施例中為  $\leq 0.1\text{ dB/turn}$ ，或甚至  $\leq 0.01\text{ dB/turn}$ 。在某些具體實施例中，該光纖具有被彎曲成彎曲半徑  $\leq 2\text{ mm}$  的部分，在  $1550\text{ nm}$  下該光纖顯現的彎損利用包括半徑為  $2\text{ mm}$  之心軸進行之心軸纏繞測試係被決定為  $\leq 1\text{ dB/turn}$ ，例如  $\leq 0.55\text{ dB/turn}$ ，而在某些具體實施例中為  $\leq 0.1\text{ dB/turn}$ ，或甚至  $\leq 0.01\text{ dB/turn}$ 。

【0023】 現在將詳細參考本發明較佳具體實施例，其示例係於附圖中描述。

#### 【圖式簡單說明】

【0024】 圖1描述一光纖，其透過一套接管接頭連接至一矽光子波導，該套接管接頭具有一彎曲洞以支撐該光纖的一部分；

【0025】 圖2A為根據本揭示發明之一示例光纖的橫斷面圖；

【0026】 圖2B示意描繪一折射指數分佈，其對應於圖2A的光纖；

【0027】 圖3描述最小彎曲半徑（mm）與光纖包層直徑（ $\mu\text{m}$ ）之間的關係；及

【0028】 圖4描述於此揭示之另一光學波導光纖的折射指數分佈。

#### 【實施方式】

【0029】 其他的特徵及優點將於以下詳細描述中闡述，且對於本領域技術人員而言從以下敘述將是顯而易見的，或是透過以下敘述連同申請專利範圍及附圖一起所敘述的實作係可辨認這些特徵及優點。

#### 定義與術語

【0030】 「折射指數分佈」係為折射指數或相對折射指數與在該波導光纖內徑相位置之間的關係。對於該折射指數分佈每段的半徑則以縮寫 $r_1$ 、 $r_2$ 、 $r_3$ 、 $r_4$ 等等表示，而小寫與大寫於此為可互換使用（例如， $r_1$ 等同於 $R_1$ ）。

【0031】 用詞「相對折射指數百分比」（在此也稱為「相對折射指數」、「折射指數差量」）則定義為 $\Delta\% = 100 \times (n_i^2 - n_c^2) / 2n_i^2$ ，且當在此使用時，除非另外說明，否則 $n_c$ 為該第一外包層區域40（其在某些具體實施例中為未摻雜的二氧化矽）的平均折射指數。當在此使用時，相對折射指數係以 $\Delta$ 表示，且除非另外指明，否則其數值的單位為「%」。該用詞差量、 $\Delta$ 、 $\Delta\%$ 、 $\%\Delta$ 、差量%、%差量與百分比差量於此可互換使用。亦即，當在此使用時，一已知光纖區域的相對折射指數百分比（或相對折射指數，或折射指數差量）係相對於未摻雜二氧化矽

而進行量測。在一區域的折射指數小於未摻雜二氧化矽之平均折射指數的情況中，該相對折射指數百分比為負值，並可以被稱作為具有一凹陷區域或凹陷指數。在一區域的折射指數大於未摻雜二氧化矽之平均折射指數的情況中，該相對折射指數百分比為正值。在此，「上摻雜物（**u p d o p a n t**）」被視為相對於純粹未摻雜二氧化矽而言，具有能夠提高折射指數之傾向的摻雜物。在此，「下摻雜物（**d o w n d o p a n t**）」被視為相對於純粹未摻雜二氧化矽而言，具有能夠降低折射指數之傾向的摻雜物。上摻雜物的實例包含 **G e O<sub>2</sub>**（氧化鍺）、**A l<sub>2</sub> O<sub>3</sub>**（三氧化二鋁）、**P<sub>2</sub> O<sub>5</sub>**（五氧化二磷）、**T i O<sub>2</sub>**（二氧化鈦）、**C l**（氯）、**B r**（溴）。下摻雜物的實例包含氟與硼。

**【0032】** 一波導光纖的「色散現象」，在此除非另外註明也被稱為「色散」，係為該材料色散、該波導色散與該模態間色散的總和。在單模波導光纖的情況中，該模態間色散為零。零色散波長為該色散具有數值為零時的波長。色散斜率則為色散對於波長的變化率。

**【0033】** 「有效面積」定義為：

$$A_{e f f} = 2 \pi \left( \int f^2 r d r \right)^2 / \left( \int f^4 r d r \right)$$

其中，積分範圍為0到 $\infty$ ，而f為與在該波導中傳播之光相關聯之電場的橫向分量。有效面積  $A_{e f f}$  與該光學訊號的波長有關，並且於此報告係用於 **850 n m**、**980 n m**、**1060 n m** 及 **1550 n m**。當在此使用時，除非另外註明，否

則「有效面積」或「 $A_{eff}$ 」意指在1550nm波長下的光學有效面積。

【0034】該用詞「阿爾法參數」或「 $\alpha$ 參數」或「 $\alpha$ 數值」或只用「 $\alpha$ 」意旨用於定義該纖芯相對折射指數分佈的參數，以 $\Delta(r)$ 的形式表示，具有單位為「%」，其中 $r$ 為半徑，並依循以下方程式，

$$\Delta(r) = \Delta(r_0) (1 - [ |r - r_0| / (r_1 - r_0) ]^\alpha)$$

其中， $r_0$ 為 $\Delta(r)$ 為最大值（在此也稱為 $\Delta_{1max}$ ）的點， $r_1$ 為 $\Delta(r)$ %為零的點，而 $r$ 在 $r_i \leq r \leq r_f$ 的範圍中，其中 $\Delta$ 如以上定義， $r_i$ 為 $\alpha$ 分佈的起點， $r_f$ 為 $\alpha$ 分佈的終點，而 $\alpha$ 為一實數指數。在於此敘述之光纖的某些具體實施例中（舉例而言，在光纖纖芯中不具有中心線傾角的光纖中） $\Delta(r_0) = \Delta(r_1)$ 。在某些具體實施例中， $r_i = r_f$ 。

【0035】該用詞「凹溝」與「凹陷指數包層區域」於此可互換使用，並意指為一包層區域，其具有與其接觸的相鄰區域相比之下為低之最小相對折射指數。該凹溝體積 $V_3$ 於此定義為

$$V_3 = 2 \int \Delta_{3-2}(r) r dr$$

其中， $\Delta_{3-2}(r) = \Delta_3 - \Delta_2(r)$ 為在徑向位置 $r_3$ 及 $r_2$ 之間的一已知徑向位置 $r$ ，其中 $r_2$ 為包層區域30的內半徑，而 $r_3$ 為包層區域30的外半徑。因此， $V_3$ 的積分範圍係從 $r_2$ 到 $r_3$ 。

【0036】該用詞「 $\mu m$ 」與「微米」於此可互換使用。

【0037】 模場直徑 (MFD) 係使用 Peterman II 方法量測，其中， $2w = \text{MFD}$ ，且  $w^2 = (2 \int_0^\infty f^2 r dr / \int_0^\infty [df/dr]^2 r dr)$ ，積分範圍從 0 到  $\infty$ ，而  $\text{MFD}_{1550}$  為在 1550 nm 波長下的模場直徑。

【0038】 一波導光纖的彎抗可利用在規定的測試條件下引致衰減的方法加以量測，舉例而言，利用將該光纖繞著一規定直徑心軸部屬或圍繞的方式進行，例如，圍繞 6 mm、10 mm 或 20 mm 或類似直徑心軸(例如，「1 x 10 mm 直徑整體彎損」或「1 x 20 mm 直徑整體彎損」) 一圈，並量測每圈的衰減增加的方式。

【0039】 光纖截止(在此也稱為光纖截止波長)係利用標準的 2 m 光纖截斷測試，FOTP-80 (EIA-TIA-455-80) 加以量測，以獲得「光纖截止波長」，也被知悉為「2 m 光纖截止」或「量測截止」。FOTP-80 標準測試係對於使用受控制彎曲量去除較高階模態的方式，或是將該光纖的頻譜反應正規化至一多模光纖頻譜反應的方式進行。

【0040】 談到當繞著 2.5 mm 半徑心軸一圈的光纖截止波長時，係意指利用 2 m 光纖截斷測試，FOTP-80 (EIA-TIA-455-80) 的方式量測得到的光纖截止波長，FOTP-80 (EIA-TIA-455-80) 測試係從距離光發射之光纖端部的 20 cm 距離內，配置一個繞著 2.5 mm 半徑心軸的額外單彎。類似的，談到當繞著 2 mm 半徑心軸一圈的光纖截止波長，係意指利用 2 m 光纖截斷測試，

FOTP-80 (EIA-TIA-455-80) 的方式量測得到的光纖截止波長，FOTP-80 (EIA-TIA-455-80) 測試則係從距離光發射之光纖端部的 20 cm 距離內，配置一個繞著 2 mm 半徑心軸的額外單彎。

【0041】談到在此使用纜線截止波長或「纜線截止」時，意指利用在 EIA-455 光纖測試程序中所敘述之 22 m 纜線截斷測試所量測得到的單模截止，此 EIA-455 光纖測試程序為 EIA-TIA 光纖標準的部分，也就是電子產業協會－電信產業協會光纖標準。

【0042】談到具有 2.5 mm 半徑彎曲的纜線截止時，意指利用在 EIA-445 光纖測試程序中所敘述之 22 m 纜線截斷測試所量測得到的單模截止。其程序則繞著一 2.5 mm 半徑心軸的一額外單彎量測。類似的，談到具有 2 mm 半徑彎曲的纜線截止時，意指利用在 EIA-445 光纖測試程序中所敘述之 22 m 纜線截斷測試所量測得到的單模截止。其程序則繞著一 2 mm 半徑心軸的一額外單彎量測。

【0043】除非在此特別說明，否則光學性質（像是色散、色散斜率等等）係針對於 LP01 模態所報告。

【0044】一項挑戰性的問題是以低成本將來自一矽光子裝置的光耦合至一單模光纖。一種吸引人的方法是使用光柵以將來自一矽 (Si) 波導表面放出的光耦合至一光纖，如圖 1 所示。因為在該 Si 波導上方的緊密空間（大約 4 - 5 mm 或更小），因此該光纖需要在適宜的 3 mm 或更小的彎曲半徑下，以四分之一圈的方式彎曲，舉例而言，在

$\leq 2.5 \text{ mm}$  的彎曲半徑下。該彎曲光纖連接器可為例如具有彎曲孔洞的玻璃或陶瓷套圈。該光纖的塗層被剝除到該玻璃包層，且該光纖的剝除部分被插入至該孔洞中並以環氧樹脂膠黏。普通可比較的光纖可能在剝除以及後續的光纖插入程序透過該耦合裝置 7（連接器 7）的孔洞期間受到傷害，而由於光纖破裂造成光纖的機械故障，這是由於受到其被彎曲到如此小直徑時的應力，而經受應力之表面流動所造成。因此，在可比較的光纖中，在承受應力下，該表面缺陷將傳播深至玻璃之中，造成機械故障（光纖破裂）及 / 或減短生命週期。然而，於此揭示之該光纖 100 即使在彎曲至  $3 \text{ mm}$  或小於  $3 \text{ mm}$  半徑下，仍可以耦合至矽光子裝置，而不造成因光纖破裂形成的機械故障。光纖 100 有利的是，可以有利地插入透過在該耦合裝置 7 的孔洞之中，而不造成因光纖破裂形成的光纖機械故障，該耦合裝置 7 則具有  $2.5 \text{ mm}$  或小於  $2.5 \text{ mm}$  的彎曲半徑  $r_b$ （例如， $1 \text{ mm} \leq r_b \leq 2 \text{ mm}$ ，且至少在某些具體實施例中， $0.5 \text{ mm} \leq r_b \leq 2 \text{ mm}$ ），並因此可以被彎曲至如此的小直徑，而不造成強度的實質損失或生命週期的顯著損失。光纖 100 有利的是具有改良的表面傷害抵抗性並具有低彎損。

【0045】於此揭示之光纖 100 係能夠顯現在  $1550 \text{ nm}$  下其有效面積  $A_{eff}$  係大於大約  $55 \mu\text{m}^2$ ，較佳的是介於  $60$  及  $85 \mu\text{m}^2$  之間。在某些較佳具體實施例中，在  $1550 \text{ nm}$  下的有效面積係介於大約  $75$  及  $82 \mu\text{m}^2$  之間。

【0046】 圖2A為該光纖(100)之一示例具體實施例的橫斷面圖。該光纖(100)包括一中心纖芯區域10，其繞著一中心軸AC位於中心，該光纖(100)也包括一選擇性內包層區域20、具有凹溝形式而因此被稱作為「凹溝區域」30或「凹陷包層區域」的第三區域30，以及建構一第一外包層並因此被稱作為一「外包層區域」40的第四區域40(在此也被稱作為一第一外包層區域40)。該選擇性內包層區域20、該凹溝區域30與該第一外包層區域40一起定義一包層區域50(在此也稱為「包層」50)。在此敘述之示例具體實施例中，該包層50之包層區域20、30、40較佳地係為玻璃，並由一機械可靠層 $M_L$ (該最外側包層或區域60)所圍繞，該層係由 $TiO_2$ 摻雜的二氧化矽所構成。該外包層60(也就是該機械穩定層 $M_L$ )可由一塗層70圍繞，其包含一次被覆層P與次級被覆層S，其在被彎曲以及將一光纖100插入至一矽光子裝置之前，可從該光纖100剝除。

【0047】 圖2B為該光纖(100)之一示例具體實施例的相對折射指數分佈 $\Delta(\%)$ 對於光纖半徑 $r$ 的示意描繪。該圖形係從該中心軸AC徑向朝外，也就是從 $r=0$ 開始。該纖芯區域10具有外半徑 $r_1$ 與相對折射指數 $\Delta_1$ 。該內包層區域20從該徑向位置 $r_1$ 延伸至一徑向位置 $r_2$ ，並具有相對折射指數 $\Delta_2$ 。該凹溝區域30(也就是該凹陷指數包層區域)從該徑向位置 $r_2$ 延伸至一徑向位置 $r_3$ ，並具有相對折射指數 $\Delta_3$ 。該外包層區域40從該徑向位置 $r_3$ 延伸至

一徑向位置  $r_4$ ，並具有相對折射指數  $\Delta_4$ 。該第二外包層 **60**（也就是該最外側包層區域 **60**）圍繞該第一外包層區域 **40**。該第二外包層區域 **60** 從該徑向位置  $r_4$  延伸至一徑向位置  $r_5$ ，並具有相對折射指數  $\Delta_5$ ，且  $\Delta_5 > \Delta_4$ 。在於此揭示的光纖具體實施例中，該第二外包層區域 **60** 的外直徑  $d_5$ （ $d_5 = 2 r_5$ ）係不大於  $130 \mu\text{m}$ ，舉例而言，不大於  $126 \mu\text{m}$ 、不大於  $125 \mu\text{m}$ ，且在某些具體實施例中，不大於  $100 \mu\text{m}$  或甚至不大於  $82 \mu\text{m}$ 。舉例而言，在某些具體實施例中， $d_5$  不大於  $80 \mu\text{m}$ 、不大於  $75 \mu\text{m}$ 、不大於  $60 \mu\text{m}$ 、不大於  $55 \mu\text{m}$  或不大於  $50 \mu\text{m}$ 。在某些具體實施例中， $20 \mu\text{m} \leq d_5 \leq 126 \mu\text{m}$ 。在某些具體實施例中， $20 \mu\text{m} \leq d_5 \leq 110 \mu\text{m}$ ，或  $20 \mu\text{m} \leq d_5 \leq 100 \mu\text{m}$ ，或  $20 \mu\text{m} \leq d_5 \leq 90 \mu\text{m}$ ，或甚至  $20 \mu\text{m} \leq d_5 \leq 80 \mu\text{m}$ 。在某些具體實施例中， $20 \mu\text{m} \leq d_5 \leq 70 \mu\text{m}$ ，在某些具體實施例中， $20 \mu\text{m} \leq d_5 \leq 50 \mu\text{m}$ ，而在某些具體實施例中， $60 \mu\text{m} \leq d_5 \leq 126 \mu\text{m}$ 。在某些具體實施例中， $30 \mu\text{m} \leq d_5 \leq 126 \mu\text{m}$ 。在某些具體實施例中， $30 \mu\text{m} \leq d_5 \leq 110 \mu\text{m}$ ，或  $30 \mu\text{m} \leq d_5 \leq 100 \mu\text{m}$ 、 $30 \mu\text{m} \leq d_5 \leq 90 \mu\text{m}$ ，或甚至  $30 \mu\text{m} \leq d_5 \leq 80 \mu\text{m}$ 。在某些具體實施例中， $30 \mu\text{m} \leq d_5 \leq 70 \mu\text{m}$ 。在某些具體實施例中， $30 \mu\text{m} \leq d_5 \leq 50 \mu\text{m}$ 。在某些具體實施例中， $40 \mu\text{m} \leq d_5 \leq 126 \mu\text{m}$ 。在某些具體實施例中， $40 \mu\text{m} \leq d_5 \leq 100 \mu\text{m}$ 、 $40 \mu\text{m} \leq d_5 \leq 90 \mu\text{m}$  或甚至  $40 \mu\text{m} \leq d_5 \leq 80 \mu\text{m}$ 。在某些具體實施例中，

$40\ \mu\text{m} \leq d_5 \leq 70\ \mu\text{m}$ ，而在某些具體實施例中， $40\ \mu\text{m} \leq d_5 \leq 60\ \mu\text{m}$ 。根據某些具體實施例，該包層**60**的直徑  $d_5$  舉例而言係為  $50$  至  $125\ \mu\text{m}$ ，或  $60$  至  $125\ \mu\text{m}$ ；而在某些具體實施例中為  $70$  至  $100\ \mu\text{m}$ 。在某些具體實施例中， $60\ \mu\text{m} \leq d_5 \leq 126\ \mu\text{m}$ 、 $60\ \mu\text{m} \leq d_5 \leq 125\ \mu\text{m}$ ，在某些具體實施例中， $60\ \mu\text{m} \leq d_5 \leq 110\ \mu\text{m}$ ，而在某些具體實施例中， $80\ \mu\text{m} \leq d_5 \leq 125\ \mu\text{m}$ 。

【0048】一塗層**70**圍繞該包層**60**。該塗層**70**延伸至一外半徑  $r_6$ 。

【0049】如以上敘述，光纖**100**能夠在彎曲光纖連接器應用時，於小曲率半徑下提供低彎損以及表面傷害的高抵抗性，舉例而言，當利用一套圈連接器**5**並將其耦合至一矽光子晶片**7**時，如圖**1**中所示。在圖**1**中，於該連接器**5**內側，該光纖以大約  $3\ \text{mm}$  或小於  $3\ \text{mm}$  的彎曲半徑  $r_b$  彎曲大約四分之一圈（例如， $0.5\ \text{mm} \leq r_b \leq 3\ \text{mm}$ 、 $1\ \text{mm} \leq r_b \leq 2.5\ \text{mm}$ 、 $1\ \text{mm} \leq r_b \leq 2\ \text{mm}$ 、 $1\ \text{mm} \leq r_b \leq 1.5\ \text{mm}$ ，或  $1\ \text{mm} \leq r_b \leq 2\ \text{mm}$ ），並耦合至位於一Si波導**7'**內的光柵**7<sub>G</sub>**。根據在此揭示之光纖**100**的至少某些具體實施例，該光纖**100**在繞著  $2.5\ \text{mm}$  半徑心軸彎曲一圈時，具有  $< 1550\ \text{nm}$  的單模截止波長，也具有在  $1550\ \text{nm}$  下至少為  $65\ \mu\text{m}^2$  並小於  $85\ \mu\text{m}^2$  的有效面積，以及在利用  $2.5\ \text{mm}$  半徑心軸進行心軸纏繞測試時，在  $1550\ \text{nm}$  下決定為  $\leq 1.0\ \text{dB/turn}$  的彎損。

【0050】 根據在此揭示之光纖**100**的至少某些具體實施例，在1550nm下繞著2.5mm彎曲半徑 $r_b$ 心軸彎曲一圈時具有的彎損為 $\leq 0.8 \text{ dB/turn}$ ，在某些具體實施例中為 $\leq 0.5 \text{ dB/turn}$ ，在某些具體實施例中為 $\leq 0.4 \text{ dB/turn}$ ，在某些具體實施例中為 $\leq 0.2 \text{ dB/turn}$ ，在某些具體實施例中為 $\leq 0.1 \text{ dB/turn}$ ，在某些具體實施例中為 $\leq 0.05 \text{ dB/turn}$ ，而在某些具體實施例中為 $\leq 0.01 \text{ dB/turn}$ 。同樣的，根據在此揭示之光纖**100**的至少某些具體實施例，在1550nm下繞著2mm彎曲半徑 $r_b$ 心軸彎曲一圈時具有的彎損為 $\leq 1 \text{ dB/turn}$ ，在某些具體實施例中為 $\leq 0.5 \text{ dB/turn}$ ，而在某些具體實施例中為 $\leq 0.4 \text{ dB/turn}$ 。同樣的，根據在此揭示之光纖**100**的至少某些具體實施例，在1550nm下繞著2mm彎曲半徑 $r_b$ 心軸彎曲一圈時具有的彎損為 $\leq 0.2 \text{ dB/turn}$ ，在某些具體實施例中為 $\leq 0.1 \text{ dB/turn}$ ，而在某些具體實施例中為 $\leq 0.05 \text{ dB/turn}$ 。同樣的，根據在此揭示之光纖**100**的至少某些具體實施例，在1550nm下繞著2mm彎曲半徑 $r_b$ 心軸彎曲一圈時具有的彎損為 $\leq 0.02 \text{ dB/turn}$ ，而在某些具體實施例中為 $\leq 0.01 \text{ dB/turn}$ 。同樣的，根據在此揭示之光纖**100**的至少某些具體實施例，在1550nm下繞著1.5mm彎曲半徑 $r_b$ 心軸彎曲一圈時具有的彎損為 $\leq 1 \text{ dB/turn}$ ，在某些具體實施例中為 $\leq 0.5 \text{ dB/turn}$ ，而在某些具體實施例中為 $\leq 0.4 \text{ dB/turn}$ ，而在某些具體實施例中為 $\leq 0.2 \text{ dB/turn}$ 。同樣的，根據在此揭示之光纖

**100**的至少某些具體實施例，在 $1550\text{ nm}$ 下繞著 $1\text{ mm}$ 彎曲半徑 $r_b$ 心軸彎曲一圈時具有的彎損為 $\leq 1\text{ dB/turn}$ ，在某些具體實施例中為 $\leq 0.75\text{ dB/turn}$ ，在某些具體實施例中為 $\leq 0.5\text{ dB/turn}$ ，而在某些具體實施例中為 $\leq 0.4\text{ dB/turn}$ ，而在某些具體實施例中為 $\leq 0.2\text{ dB/turn}$ 。

【0051】 該最外側包層**60**（在此也稱為 $M_L$ 層或該第二外包層）由 $\text{TiO}_2$ （二氧化鈦）構成，並保護該第一外包層**40**的外側玻璃表面避免在加工期間以及在該塗層**70**的剝除期間受傷，同時也改善光纖的機械可靠度，特別是在組裝微型玻璃元件時對玻璃表面可能發生的擦傷，該第一外包層**40**在此也稱作為第一外包層區域**40**。

【0052】 在圖**2B**的分佈中，在包層中的凹溝區域**30**具有固定的折射指數，其小於該內包層區域**20**以及該第一外包層區域**40**的折射指數。該光纖**100**的纖芯區域**10**相較於該等光纖區域**20**、**30**或**40**而言具有最高的相對折射指數。在某些具體實施例中，該纖芯區域**10**可以在該中心線處或靠近該中心線處具有較低的折射指數區域（於本領域係被知悉為「中心線傾角」），這未於圖**2B**中繪示。

【0053】 應該注意的是，該內包層區域**20**係為選擇性，並可如以上所述被省略。當省略內包層區域**20**時，該凹陷指數區域**30**係直接相鄰該纖芯區域**10**。相對折射指數 $\Delta_1$ 、 $\Delta_3$ 及 $\Delta_4$ 的相對順序則滿足 $\Delta_1 > \Delta_4 > \Delta_3$ 的條件。

【0054】在於此揭示的具體實施例中，相對折射指數 $\Delta_1$ 、 $\Delta_2$ 、 $\Delta_3$ 及 $\Delta_4$ 的相對順序則滿足 $\Delta_1 > \Delta_4 > \Delta_3$ 以及 $\Delta_1 > \Delta_2 > \Delta_3$ 的條件。 $\Delta_2$ 及 $\Delta_4$ 的數值可為相同或是彼此互有大小，但 $\Delta_2$ 及 $\Delta_4$ 兩者都介於 $\Delta_1$ 及 $\Delta_3$ 之間。

【0055】根據在此敘述之光纖**100**的該等具體實施例，該纖芯區域**10**（相對於該外包層區域**40**的 $\Delta_4$ ）的最大相對折射指數 $\Delta_1$ 係介於0.3%至0.6%，較佳的是介於0.32%至0.5%。根據某些具體實施例，該纖芯區域**10**具有的半徑 $r_1$ 係介於3至6 $\mu\text{m}$ ，較佳的是介於4 $\mu\text{m}$ 及5 $\mu\text{m}$ 。該纖芯區域**10**具有 $\alpha > 10$ 的步階指數分佈，或替代的也可以顯現一種 $\alpha \leq 10$ 的分級指數分佈，舉例而言 $\alpha \leq 5$ （例如， $1 \leq \alpha \leq 10$ 或 $1 \leq \alpha \leq 5$ ）。該內包層區域**20**的相對折射指數 $\Delta_2$ （相對於該外包層區域**40**的 $\Delta_4$ 而言）係介於-0.05至0.05%之間。該內包層區域**20**可為純二氧化矽玻璃，或是以像是氯或二氧化鋯的上摻雜劑進行摻雜的二氧化矽玻璃。該凹溝區域**30**的最小折射指數 $\Delta_3$ （相對於該外包層區域**40**的 $\Delta_4$ 而言）係介於-0.2至-0.7%之間，而在某些具體實施例中，係介於-0.3至-0.5%之間。在該等示例具體實施例中，該凹溝區域**30**係為以硼或氟摻雜的二氧化矽玻璃。該凹溝區域**30**的寬度 $w$ （ $w = r_3 - r_2$ ）係介於3至20 $\mu\text{m}$ 之間，在某些具體實施例中，係介於4及15 $\mu\text{m}$ 之間。該外包層區域**40**可為純二氧化矽玻璃，或是以像是氯或二氧化鋯的上摻雜劑進行摻雜的二氧化矽玻璃。該包層**60**（在此也稱為「最外側包層」、該第二

外包層，或一「機械可靠層」)包括5至20wt%的二氧化鈦，而在某些具體實施例中，為介於5至15wt%的二氧化鈦。該最外側包層**60**具有介於3至30 $\mu\text{m}$ 的徑向厚度 $T_M$ ，而在某些具體實施例中，係介於5至15 $\mu\text{m}$ 。該最外側包層**60**改善該光纖**100**的機械穩定性/可靠度。在至少某些具體實施例中， $\Delta_5 > \Delta_1$ 。

【0056】該光纖**100**的外包層區域**40**，圍繞該較低指數凹溝區域**30**。在於此敘述之該等示例具體實施例中，該外包層於半徑 $r_3$ 處開始，具有外半徑 $r_4$ 。該光纖**100**的外包層區域**40**包括相對折射指數 $\Delta_4$ ，其高於該凹溝區域**30**的相對折射指數 $\Delta_3$ ，藉此形成一種相對於凹溝區域**30**而言為「上摻雜」的區域。該凹溝區域**30**相對於純二氧化矽而言較佳地係為下摻雜，舉例而言，利用氟或硼。然而要注意，該外包層區域**40**可為純二氧化矽，或可為相對於純二氧化矽而言為上摻雜。

【0057】該凹溝區域**30**的體積 $V_3$ 的絕對數值 $|V_3|$ 可大於45% $\Delta\mu\text{m}^2$ ，而在某些具體實施例中可大於50% $\Delta\mu\text{m}^2$ 。該凹溝區域**30**體積 $V_3$ 的絕對數值 $|V_3|$ 在某些具體實施例中係至少為60% $\Delta\mu\text{m}^2$ ，而在某些具體實施例中係至少為80% $\Delta\mu\text{m}^2$ 。在某些具體實施例中，該第一包層區域(2)體積 $V_3$ 的絕對數值係小於200% $\Delta\mu\text{m}^2$ ，在某些具體實施例中係小於150% $\Delta\mu\text{m}^2$ ，而在某些具體實施例中係小於125% $\Delta\mu\text{m}^2$ 。根據某些具體實施例，體積 $V_3$ 的絕對數值係介於大約45及200% $\Delta\mu\text{m}^2$ 之間，舉例

而言介於  $60$  及  $200\% \Delta \mu m^2$  之間，或舉例而言介於  $60$  及  $190\% \Delta \mu m^2$  之間，或介於  $45$  及  $175\% \Delta \mu m^2$  之間，或介於  $60$  及  $175\% \Delta \mu m^2$  之間，舉例而言介於  $45$  及  $150\% \Delta \mu m^2$  之間，或介於  $60$  及  $150\% \Delta \mu m^2$  之間，介於  $80$  及  $150\% \Delta \mu m^2$  之間，或介於  $60$  及  $125\% \Delta \mu m^2$  之間，或介於  $80$  及  $125\% \Delta \mu m^2$  之間。根據某些具體實施例， $80\% \Delta - \mu m^2 \leq |V_3| \leq 200\% \Delta - \mu m^2$ 。根據某些具體實施例， $70\% \Delta - \mu m^2 \leq |V_3| \leq 150\% \Delta - \mu m^2$ 。根據某些具體實施例， $100\% \Delta - \mu m^2 \leq |V_3| \leq 150\% \Delta - \mu m^2$ 。

**【0058】** 該光纖**100**的纖芯與包層區域可以利用在本領域中被熟知的方法，在一單步驟程序或多步驟程序中製造。適宜的方法包含：雙熔爐法、管棒法、摻雜沈積二氧化矽法，其一般也被稱為化學氣相沈積（「CVD」）或氣相氧化作用。多種化學氣相沈積係為已知，並適用於製造本發明之塗層光纖中所使用的纖芯與包層。其包含外部化學氣相沈積法、軸向氣相沈積法、改性化學氣相沈積法（MCVD）、內側氣相沈積法與電漿強化化學氣相沈積法（PECVD）。

**【0059】** 該等塗層光纖的玻璃部分可從一特別準備的圓柱預成形件拉伸，該圓柱預成形件係已經被局部且對稱地加熱至足以軟化玻璃的溫度，例如，對於二氧化矽玻璃而言大約為  $2000^\circ\text{C}$ 。當該預成形件被加熱時，像是藉由將該預成形件饋進並透過一熔爐時，便從該融化材料拉伸一玻璃纖維。舉例而言，參考美國專利號  $7,565,820$ 、

5,410,567、7,832,675及6,027,062，該等揭示係藉由引用方式於此整合，用於光纖製造程序的進一步細節。

【0060】圖3描述以光纖直徑（該包層區域60的外直徑）為函數之模型化及量測的最小光纖彎曲半徑的圖形。該圖形線段表示對於82°彎曲而言，經過5年生命週期的失敗概率為 $10^{-10}$ 。該模擬結果指出較窄包層直徑光纖的長期可靠性限制。光纖可靠性的計算是針對於可使用在資料中心內部之互連的短距光纖，特別是在高大規模資料中心內部（光纖長度 $l < 10\text{ m}$ ，舉例而言 $< 1\text{ m}$ ，而在某些具體實施例中係在 $1\text{ cm}$ 與 $1\text{ m}$ 之間，舉例而言， $1\text{ cm}$ 至 $50\text{ cm}$ ，或甚至 $1\text{ cm}$ 到 $25\text{ cm}$ ）。這些短距互連應該具有相當短的使用生命週期（3到5年），這與其將被連接的電子設備的生命週期相同。這些非常短的短距互連可運用於機架內或甚至伺服器內。（這與在中繼纜線等等中所使用的光纖明顯不同，這種光纖係被設計於較長的長度（ $> 50\text{ m}$ ，例如， $100\text{ m}$ 到 $1\text{ km}$ ）下操作，且應該具有較長的使用生命週期）。該等量測結果（在圖3中以圓形繪示）則與該等模擬結果一致。

【0061】圖3描繪當該光纖100具有該包層60外直徑為 $125\text{ }\mu\text{ m}$ 時，該光纖100可被彎曲至大約 $2.3\text{ mm}$ 的彎曲半徑，經過5年生命週期的失敗概率為 $10^{-10}$ （亦即，該經彎曲光纖100的生命週期期望值為至少5年）。同樣的，圖3描繪當該光纖100具有該包層60外直徑為 $100\text{ }\mu\text{ m}$ 時，該光纖100可被彎曲至大約 $1.9\text{ mm}$ 的彎曲半徑，經

過5年生命週期的失敗概率為 $10^{-10}$ （亦即，該經彎曲光纖**100**的生命週期期望值為至少5年）。此外，**圖3**描繪當該光纖**100**具有外直徑（也就是該包層**60**的直徑 $d_5$ ）為 $62.5\ \mu\text{m}$ 時，該光纖**100**可被彎曲至大約 $1.2\ \text{mm}$ 的彎曲半徑，經過5年生命週期的失敗概率為 $10^{-10}$ （亦即，該經彎曲光纖**100**的生命週期期望值為至少5年）。**圖3**也描繪當該光纖**100**具有該包層**60**外直徑為 $53\ \mu\text{m}$ 或小於 $53\ \mu\text{m}$ （例如， $40$ 至 $52\ \mu\text{m}$ ）時，該光纖**100**可被彎曲至大約 $1\ \text{mm}$ 或小於 $1\ \text{mm}$ 的彎曲半徑，經過5年生命週期的失敗概率為 $10^{-10}$ （亦即，該經彎曲光纖**100**的生命週期期望值為至少5年）。

**【0062】** **圖3**也指出當該光纖**100**包層**60**具有大約為 $40$ 至 $50\ \mu\text{m}$ （或 $20$ 至 $50\ \mu\text{m}$ ）的外直徑 $d_5$ 時，該光纖**100**可以被彎曲成大約 $0.75\ \text{mm}$ 的彎曲半徑，其經過5年生命週期的失敗概率為 $10^{-10}$ （亦即，該經彎曲光纖**100**的生命週期期望值為至少5年）。**圖3**也指出當該光纖**100**包層**60**具有大約為 $20$ 至 $30\ \mu\text{m}$ 的外直徑 $d_5$ 時，該光纖**100**可以被彎曲成大約 $0.5\ \text{mm}$ 的彎曲半徑，其經過5年生命週期的失敗概率為 $10^{-10}$ （亦即，該經彎曲光纖**100**的生命週期期望值為至少5年）。因此，該等具有一外包層**60**之光纖**100**的具體實施例，且該外包層**60**具有不大於 $125\ \mu\text{m}$ 的外直徑 $d_5$ ，舉例而言，不大於 $100\ \mu\text{m}$ ，或不大於 $82\ \mu\text{m}$ （例如， $80$ 、 $75$ 、 $65$ 、 $62.5$ 、 $50$ 、 $40$ 、 $30$ 、 $25$ 或 $20\ \mu\text{m}$ ，或於其之間），其可被彎曲成為非常小的彎

曲半徑  $r_b$ ，並能有利地在小彎曲條件下，提供改善的機械可靠度。

【0063】 根據我們分析，具有一外包層**60**之該等光纖**100**，且該外包層**60**具有不大於  $126\ \mu\text{m}$  的外直徑  $d_5$ ，其可被彎曲為非常小的半徑  $r_b$ ，並能有利地在小彎曲條件下，提供改善的機械可靠度，即使在該等玻璃表面存在可能在微型玻璃組件組裝期間，或是由於從該光纖剝除該塗層**70**時發生的小擦傷。

【0064】 根據某些具體實施例（舉例而言，表**1**至表**4**），該內包層區域**20**及/或該外包層區域**40**具有實質上為固定的相對折射指數分佈，也就是於該內包層區域內任意兩半徑下的相對折射指數之間的差異係小於  $0.02\%$ ，且在某些較佳具體實施例中係小於  $0.01\%$ 。因此，根據於此揭示之至少某些具體實施例，該外包層區域**40**的相對折射指數分佈具有實質上為平坦的形狀。同樣的，根據於此揭示之至少某些具體實施例，該內包層區域**20**的相對折射指數分佈具有實質上為平坦的形狀。

【0065】 該纖芯區域（**1**）可為一步階指數纖芯，或舉例而言在圖**2B**中所示，其可以包含一種  $\alpha$  形狀（舉例而言，同樣也參考以下的圖**4**）。

【0066】 根據某些具體實施例，該光纖顯現出：

(i)  $MFD_{1550} > 8\ \mu\text{m}$  （舉例而言，如  $8.3\ \mu\text{m} \leq MFD_{1550} \leq 10.5\ \mu\text{m}$ ，而在某些具體實施例中， $MFD_{1550} > 9\ \mu\text{m}$ ，舉例而言  $9\ \mu\text{m}$  至  $10.3\ \mu\text{m}$ ）；

- (ii) 纜線截止波長大於  $1260\text{ nm}$ ，並小於  $1540\text{ nm}$ ；
- (iii) 在  $1550\text{ nm}$  波長於  $2.5\text{ mm}$  半徑心軸下量測的整體損失為  $\leq 1\text{ dB/turn}$ ；及
- (iv) 在  $1550\text{ nm}$  波長於  $5\text{ mm}$  半徑心軸下量測的整體損失為  $< 0.5\text{ dB/turn}$ 。

【0067】 根據某些具體實施例， $1200\text{ nm} < \text{纜線截止波長} < 1540\text{ nm}$ 。根據某些具體實施例，當配置一個繞著  $2.5\text{ mm}$  半徑心軸的額外單彎時， $1200\text{ nm} < \text{纜線截止波長} < 1540\text{ nm}$ 。

【0068】 根據某些具體實施例，該光纖顯現出：

- (i)  $\text{MFD}_{1550} > 8\text{ }\mu\text{m}$  (例如， $8.3\text{ }\mu\text{m} \leq \text{MFD}_{1550} \leq 10.5\text{ }\mu\text{m}$  或  $8.5\text{ }\mu\text{m} \leq \text{MFD}_{1550} \leq 10.5\text{ }\mu\text{m}$ ，而在某些具體實施例中， $\text{MFD}_{1550} > 9\text{ }\mu\text{m}$ ，舉例而言  $9\text{ }\mu\text{m}$  至  $10.3\text{ }\mu\text{m}$ )；
- (ii) 纜線截止波長大於  $1260\text{ nm}$ ，並小於  $1540\text{ nm}$ ；
- (iii) 於  $2.5\text{ mm}$  半徑心軸下的彎損為  $\leq 1\text{ dB/turn}$ ；及
- (iv) 於  $5\text{ mm}$  半徑心軸下的彎損為  $< 0.5\text{ dB/turn}$ 。

其中，該彎損係為整體彎損，並在  $1550\text{ nm}$  波長下量測

【0069】 根據某些具體實施例，該光纖顯現出  $0.001\text{ dB/turn} < \text{在 } 2.55\text{ mm} \text{ 彎曲半徑下的整體彎損} < 0.55\text{ dB/turn}$ ；且  $0.001\text{ dB/turn} < \text{在 } 5\text{ mm} \text{ 彎曲半徑下的整體彎損} < 0.5\text{ dB/turn}$ ；其中該整體彎損係在  $1550\text{ nm}$  波長下量測。

【0070】 根據某些具體實施例，該光纖顯現出  $\text{MFD}_{1550} > 8\text{ }\mu\text{m}$  (例如， $8.3\text{ }\mu\text{m} \leq \text{MFD}_{1550} \leq 10.5\text{ }\mu\text{m}$ ，

舉例而言  $8.3 \mu\text{m} \leq \text{MFD}_{1550} \leq 10.5 \mu\text{m}$ ，而在某些具體實施例中， $\text{MFD}_{1550} > 9 \mu\text{m}$ ，舉例而言  $9 \mu\text{m}$  至  $10.3 \mu\text{m}$  )；纜線截止  $< 1570 \text{nm}$ ；

在  $2.5 \text{mm}$  半徑下於  $1550 \text{nm}$  波長量測的整體彎損  $< 0.5 \text{dB/turn}$ 。

【0071】 於此揭示之該等光纖可以從利用傳統製造技術製成之光纖預成形件，並使用已知的光纖拉引方法與設備拉伸，舉例而言，如在美國專利號 7,565,820、5,410,567、7,832,675 及 6,027,062 中所揭示，其說明書係藉由引用方式於此整合。

【0072】 藉由以下實例，各種示例具體實施例將進一步更加清晰。對於本領域技術人員顯而易見的是，在不背離該等申請專利範圍的精神或範圍下，可以進行各種修改與變化。

【0073】 以下的表 1A、表 1B 及表 2 至表 5，列出例證模型光纖實例 1-21 的特徵，該等實例具有如圖 2B 中所示的相同折射指數。實際上，對每一實例所闡述的是該相對折射指數  $\Delta_1$ 、纖芯  $\alpha$ ，以及該中心纖芯 10 的外半徑  $r_1$ 、相對折射指數  $\Delta_2$  以及該第一包層區域 20 的外半徑  $r_2$ ，並描繪該凹溝區域 30 的體積  $V_3$ ，其係在  $r_2$  及  $r_3$  之間計算，同樣也闡述該相對折射指數  $\Delta_3$ 。同樣闡述的是在  $1310 \text{nm}$  下的色散現象與色散斜率，在  $1550 \text{nm}$  下的色散現象與色散斜率，在  $1310 \text{nm}$  及  $1550 \text{nm}$  下的模場直徑、光纖波長、在  $1310 \text{nm}$  的 MAC 數值，以及當該彎曲半徑

$r_b$  分別為 2.5 mm 及 5 mm 時，在 1550 nm 波長下計算的整體彎曲引致損失 (db/turn)。在表 1 A 至表 1 C 及表 2 至表 4 的示例具體實施例中，該外包層區域 40 為純二氧化矽，而  $\Delta_4 = 0$ 。同樣的，在表 1 A 至表 1 C 及表 2 至表 4 的示例具體實施例中，該內包層區域 20 為純二氧化矽，而  $\Delta_2 = 0$ ；在這些示例具體實施例中，該外包層 60 的  $\Delta_5$  為大約 2%。因此在這些示例具體實施例中，該內包層區域 20 的折射指數係與該外包層區域 40 的折射指數相同。

表 1 A

參數	實例 1	實例 2	實例 3	實例 4	實例 5
纖芯 $\Delta$ (%)	0.31	0.31	0.31	0.31	0.33
纖芯摻雜物	氧化鋅	氧化鋅	氧化鋅	氧化鋅	氧化鋅
纖芯 $\alpha$	20	20	20	20	20
纖芯半徑( $r_1$ 、 $\mu m$ )	4.7	4.7	4.7	4.7	4.5
(選擇性)內包層 $\Delta$	0	0	0	0	0
該選擇性內包層的外半徑( $r_2$ 、 $\mu m$ )	7.23	7.23	7.23	7.23	8.2
凹溝開始位置( $r_2$ 、 $\mu m$ )	7.23	7.23	7.23	7.23	8.2
凹溝 $\Delta$ (%)	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4
凹溝摻雜物	氟	氟	氟	氟	氟
凹溝結束位置( $r_3$ 、 $\mu m$ )	13.23	15.23	17.23	19.23	14.2
凹溝體積( $\% \cdot \mu m^2$ )	-49.1	-71.9	-97.8	-127.0	-53.8
外包層區域 40 的外半徑 $r_4$	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0
外包層區域 40 的外半徑 $r_4$	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0
外包層 $\Delta_4$ (%)	0	0	0	0	0
機械穩定層(第二外包層 60) 外半徑( $r_5$ 、 $\mu m$ )	62.5	62.5	62.5	62.5	62.5
機械穩定層摻雜物	二氧化鈦	二氧化鈦	二氧化鈦	二氧化鈦	二氧化鈦
機械穩定層摻雜物(wt.%)	10	10	10	10	10
該光纖包層玻璃部分的外半徑( $\mu m$ )	62.5	62.5	62.5	62.5	62.5
理論截止波長(nm)	1199	1199	1199	1199	1217

1310nm 下的 MFD( $\mu\text{m}$ )	9.1	9.1	9.1	9.1	9.0
1310nm 下的有效面積 ( $\mu\text{m}^2$ )	67.8	67.8	67.8	67.8	65.5
1310nm 下的色散 (ps/(nm•km))	3.5	3.5	3.5	3.5	2.2
1310nm 下的色散斜率 (ps/(nm <sup>2</sup> •km))	0.0927	0.0927	0.0927	0.0927	0.0921
1550nm 下的 MFD( $\mu\text{m}$ )	9.8	9.8	9.8	9.8	9.9
1550nm 下的有效面積 ( $\mu\text{m}^2$ )	78.0	78.0	78.0	78.0	77.5
1550nm 下的色散 (ps/(nm•km))	21.7	21.7	21.7	21.7	20.4
1550nm 下的色散斜率 (ps/(nm <sup>2</sup> •km))	0.0635	0.0637	0.0638	0.0638	0.0642
纜線截止波長(nm)	1309	1373	1446	1528	1308
在 1550nm 下，當繞著 2.5mm 彎曲半徑( $r_b$ )彎曲時，整體彎 曲引致的損失(dB/turn)	1.75	0.32	0.045	0.005	0.96
在 1550nm 下，當繞著 5mm 彎曲半徑( $r_b$ )彎曲時，整體彎 曲引致的損失(dB/turn)	0.4062	0.0753	0.0110	0.0013	0.2169

表 1 B

參數	實例 2B	實例 3B	實例 4B	實例 5B
纖芯 $\Delta$ (%)	0.31	0.31	0.31	0.33
纖芯摻雜物	氧化鋅	氧化鋅	氧化鋅	氧化鋅
纖芯 $\alpha$	20	20	20	20
纖芯半徑( $r_1$ 、 $\mu\text{m}$ )	4.7	4.7	4.7	4.5
(選擇性)內包層 $\Delta$	0	0	0	0
凹溝開始位置( $r_2$ 、 $\mu\text{m}$ )	7.23	7.23	7.23	8.2
凹溝 $\Delta$ (%)	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4
凹溝摻雜物	氟	氟	氟	氟
凹溝結束位置( $r_3$ 、 $\mu\text{m}$ )	15.23	17.23	19.23	14.2
凹溝體積(%• $\mu\text{m}^2$ )	-71.9	-97.8	-127.0	-53.8
機械穩定層開始位置 $r_4$ ( $\mu\text{m}$ )	30.0	35	30.0	27.0
機械穩定層結束位置 $r_5$ ( $\mu\text{m}$ )	32.5	40	35	30
機械穩定層摻雜物	二氧化 鈦	二氧化 鈦	二氧化 鈦	二氧化 鈦
機械穩定層摻雜物(wt.%)	10	10	10	10
外半徑( $\mu\text{m}$ )	30	40	35	30

理論截止波長(nm)	1199	1199	1199	1217
1310nm 下的 MFD( $\mu\text{ m}$ )	9.1	9.1	9.1	9.0
1310nm 下的有效面積( $\mu\text{ m}^2$ )	67.8	67.8	67.8	65.5
1310nm 下的色散(ps/(nm•km))	3.5	3.5	3.5	2.2
1310nm 下的色散斜率(ps/(nm <sup>2</sup> •km))	0.0927	0.0927	0.0927	0.0921
1550nm 下的 MFD( $\mu\text{ m}$ )	9.8	9.8	9.8	9.9
1550nm 下的有效面積( $\mu\text{ m}^2$ )	78.0	78.0	78.0	77.5
1550nm 下的色散(ps/(nm•km))	21.7	21.7	21.7	20.4
1550nm 下的色散斜率(ps/(nm <sup>2</sup> •km))	0.0637	0.0638	0.0638	0.0642
纜線截止波長(nm)	1373	1446	1528	1308
在 1550nm 下，當繞著 2.5mm 彎曲半徑( $r_b$ )彎曲時，整體彎曲引致的損失(dB/turn)	0.32	0.045	0.005	0.96
在 1550nm 下，當繞著 5mm 彎曲半徑( $r_b$ )彎曲時，整體彎曲引致的損失(dB/turn)	0.0753	0.0110	0.0013	0.2169

表 2

參數	實例 6	實例 7	實例 8	實例 9	實例 10
纖芯 $\Delta$ (%)	0.33	0.33	0.33	0.34	0.34
纖芯摻雜物	氧化鋅	氧化鋅	氧化鋅	氧化鋅	氧化鋅
纖芯 $\alpha$	20	20	20	20	20
纖芯半徑( $r_1$ 、 $\mu\text{ m}$ )	4.5	4.5	4.5	4.3	4.3
凹溝開始位置( $r_2$ 、 $\mu\text{ m}$ )	8.2	8.2	8.2	13	13
凹溝 $\Delta$ (%)	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4
凹溝摻雜物	氟	氟	氟	氟	氟
凹溝結束位置( $r_3$ 、 $\mu\text{ m}$ )	16.2	18.2	20.2	17	19
凹溝體積(%• $\mu\text{ m}^2$ )	-78.1	-105.6	-136.3	-48.0	-76.8
機械穩定層開始位置( $\mu\text{ m}$ )	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0
機械穩定層結束位置( $\mu\text{ m}$ )	62.5	62.5	62.5	62.5	62.5
機械穩定層摻雜物	二氧化鈦	二氧化鈦	二氧化鈦	二氧化鈦	二氧化鈦
機械穩定層摻雜物(wt.%)	10	10	10	10	10
外半徑( $\mu\text{ m}$ )	62.5	62.5	62.5	62.5	62.5
理論截止波長(nm)	1217	1217	1217	1234	1234
1310nm 下的 MFD( $\mu\text{ m}$ )	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0
1310nm 下的有效面積( $\mu\text{ m}^2$ )	65.5	65.5	65.5	64.2	64.2
1310nm 下的色散(ps/(nm•km))	2.2	2.2	2.2	-0.2	-0.2

1310nm 下的色散斜率 (ps/(nm <sup>2</sup> •km))	0.0921	0.0921	0.0921	0.0867	0.0867
1550nm 下的 MFD( $\mu\text{m}$ )	9.9	9.9	9.9	10.3	10.3
1550nm 下的有效面積 ( $\mu\text{m}^2$ )	77.5	77.5	77.5	80.6	80.6
1550nm 下的色散(ps/(nm•km))	20.4	20.4	20.4	16.9	16.9
1550nm 下的色散斜率 (ps/(nm <sup>2</sup> •km))	0.0643	0.0644	0.0644	0.0609	0.0610
纜線截止波長(nm)	1376	1453	1539	1252	1333
在 1550nm 下，當繞著 2.5mm 彎曲半徑( $r_b$ )彎曲時，整體彎 曲引致的損失(dB/turn)	0.15	0.02	0.002	1.58	0.18
在 1550nm 下，當繞著 5mm 彎曲半徑( $r_b$ )彎曲時，整體彎 曲引致的損失(dB/turn)	0.0359	0.0047	0.0005	0.36	0.04

表 3

參數	實例 11	實例 12	實例 13	實例 14	實例 15
纖芯 $\Delta$ (%)	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34
纖芯摻雜物	氧化鋅	氧化鋅	氧化鋅	氧化鋅	氧化鋅
纖芯 $\alpha$	20	20	20	20	20
纖芯半徑( $r_1$ 、 $\mu\text{m}$ )	4.3	4.3	4.3	4.4	4.4
凹溝開始位置( $r_2$ 、 $\mu\text{m}$ )	13	13	13	9.7	9.7
凹溝 $\Delta$ (%)	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4
凹溝摻雜物	氟	氟	氟	氟	氟
凹溝結束位置( $r_3$ 、 $\mu\text{m}$ )	21	23	25	15.7	16.7
凹溝體積(%• $\mu\text{m}^2$ )	-108.8	-144.0	-182.4	-61.0	-73.9
機械穩定層開始位置( $\mu\text{m}$ )	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0
機械穩定層結束位置( $\mu\text{m}$ )	62.5	62.5	62.5	62.5	62.5
機械穩定層摻雜物	二氧化 鈦	二氧化 鈦	二氧化 鈦	二氧化 鈦	二氧化 鈦
機械穩定層摻雜物(wt.%)	10	10	10	10	10
外半徑( $\mu\text{m}$ )	62.5	62.5	62.5	62.5	62.5
理論截止波長(nm)	1234	1234	1234	1235	1235
1310nm 下的 MFD( $\mu\text{m}$ )	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0
1310nm 下的有效面積 ( $\mu\text{m}^2$ )	64.2	64.2	64.2	64.7	64.7
1310nm 下的色散 (ps/(nm•km))	-0.2	-0.2	-0.2	1.0	1.0
1310nm 下的色散斜率	0.0867	0.0867	0.0867	0.0902	0.0902

(ps/(nm <sup>2</sup> •km))					
1550nm 下的 MFD( $\mu\text{m}$ )	10.3	10.3	10.3	10.1	10.1
1550nm 下的有效面積( $\mu\text{m}^2$ )	80.6	80.6	80.6	78.7	78.7
1550nm 下的色散(ps/(nm•km))	16.9	16.9	16.9	18.9	18.9
1550nm 下的色散斜率(ps/(nm <sup>2</sup> •km))	0.0610	0.0610	0.0610	0.0639	0.0639
纜線截止波長(nm)	1423	1521	1629	1318	1354
在 1550nm 下，當繞著 2.5mm 彎曲半徑( $r_b$ )彎曲時，整體彎曲引致的損失(dB/turn)	0.02	0.001	0.0001	0.51	0.19
在 1550nm 下，當繞著 5mm 彎曲半徑( $r_b$ )彎曲時，整體彎曲引致的損失(dB/turn)	0.004	0.0003	0.00002	0.11	0.0437

表 4

參數	實例 16	實例 17	實例 18
纖芯 $\Delta$ (%)	0.34	0.34	0.34
纖芯摻雜物	氧化鋅	氧化鋅	氧化鋅
纖芯 $\alpha$	20	20	20
纖芯半徑( $r_1$ 、 $\mu\text{m}$ )	4.4	4.4	4.4
凹溝開始位置( $r_2$ 、 $\mu\text{m}$ )	9.7	9.7	9.7
凹溝 $\Delta$ (%)	-0.4	-0.4	-0.4
凹溝摻雜物	氟	氟	氟
凹溝結束位置( $r_3$ 、 $\mu\text{m}$ )	17.7	19.7	21.7
凹溝體積(%• $\mu\text{m}^2$ )	-87.7	-117.6	-150.7
機械穩定層開始位置( $\mu\text{m}$ )	60.0	60.0	60.0
機械穩定層結束位置( $\mu\text{m}$ )	62.5	62.5	62.5
機械穩定層摻雜物	二氧化鈦	二氧化鈦	二氧化鈦
機械穩定層摻雜物(wt.%)	10	10	10
外半徑( $\mu\text{m}$ )	62.5	62.5	62.5
理論截止波長(nm)	1235	1235	1235
1310nm 下的 MFD( $\mu\text{m}$ )	9.0	9.0	9.0
1310nm 下的有效面積( $\mu\text{m}^2$ )	64.7	64.7	64.7
1310nm 下的色散(ps/(nm•km))	1.0	1.0	1.0
1310nm 下的色散斜率(ps/(nm <sup>2</sup> •km))	0.0902	0.0902	0.0902
1550nm 下的 MFD( $\mu\text{m}$ )	10.1	10.1	10.1
1550nm 下的有效面積( $\mu\text{m}^2$ )	78.7	78.7	78.7

1550nm 下的色散(ps/(nm•km))	18.9	18.9	18.9
1550nm 下的色散斜率 (ps/(nm <sup>2</sup> •km))	0.0639	0.0639	0.0639
纜線截止波長(nm)	1393	1476	1569
在 1550nm 下，當繞著 2.5mm 彎曲半徑( $r_b$ )彎曲時，整體彎曲引致的損失(dB/turn)	0.07	0.007	0.0006
在 1550nm 下，當繞著 5mm 彎曲半徑( $r_b$ )彎曲時，整體彎曲引致的損失(dB/turn)	0.02	0.002	0.0001

表 5

參數	實例 19	實例 20	實例 22
纖芯 $\Delta$ (%)	0.34	0.34	0.31
纖芯摻雜物	氧化鋅	氧化鋅	氧化鋅
纖芯 $\alpha$	20	20	20
纖芯半徑( $r_1$ 、 $\mu m$ )	4.4	4.4	4.7
凹溝開始位置( $r_2$ 、 $\mu m$ )	9.7	9.7	7.23
凹溝 $\Delta$ (%)	-0.4	-0.4	-0.4
凹溝摻雜物	氟	氟	氟
凹溝結束位置( $r_3$ 、 $\mu m$ )	17.7	19.7	15.23
凹溝體積(% • $\mu m^2$ )	-87.7	-117.6	-71.9
機械穩定層開始位置( $\mu m$ )	20.0	22.7	18.0
機械穩定層結束位置( $\mu m$ )	22.5	26	20
機械穩定層摻雜物	二氧化鈦	二氧化鈦	二氧化鈦
機械穩定層摻雜物(wt.%)	10	10	10
外半徑( $\mu m$ )	22.5	26.5	20.5
理論截止波長(nm)	1235	1235	1199
1310nm 下的 MFD( $\mu m$ )	9.0	9.0	9.1
1310nm 下的有效面積( $\mu m^2$ )	64.7	64.7	67.8
1310nm 下的色散(ps/(nm•km))	1.0	1.0	3.5
1310nm 下的色散斜率(ps/(nm <sup>2</sup> •km))	0.0902	0.0902	0.0927
1550nm 下的 MFD( $\mu m$ )	10.1	10.1	9.8
1550nm 下的有效面積( $\mu m^2$ )	78.7	78.7	78.0
1550nm 下的色散(ps/(nm•km))	18.9	18.9	21.7
1550nm 下的色散斜率(ps/(nm <sup>2</sup> •km))	0.0639	0.0639	0.0637
纜線截止波長(nm)	1393	1476	1373
在 1550nm 下，當繞著 2.5mm 彎曲半徑( $r_b$ )彎曲時，整體彎曲引致的損失	0.07	0.007	0.32

(dB/turn)			
在 1550nm 下，當繞著 5mm 彎曲半徑 (r <sub>b</sub> ) 彎曲時，整體彎曲引致的損失 (dB/turn)	0.02	0.002	0.0753

【0074】 根據表 1 A 至表 5 的示例具體實施例，該光纖於 1550 nm 下具有一模場直徑 (MFD<sub>1550</sub>) 為  $8.3 \mu\text{m} \leq \text{MFD}_{1550} \leq 10.5 \mu\text{m}$  (例如， $8.5 \mu\text{m} \leq \text{MFD}_{1550} \leq 10.5 \mu\text{m}$ )，具有在繞著 2.5 mm 半徑心軸彎曲一圈時 < 1550 nm 的單模截止波長，在 1550 nm 下為至少  $65 \mu\text{m}^2$  並小於  $85 \mu\text{m}^2$  的有效面積，以及當使用 2.5 mm 半徑心軸進行心軸纏繞測試時，在 1550 nm 下決定為  $\leq 1.0 \text{ dB/turn}$  的彎損。

【0075】 該光纖具有圖 4 所繪示之根據一具體實施例之製造光纖 100 的經量測折射指數分佈。在圖 4 繪示之該示例具體實施例的分佈中，該纖芯區域 10 係由該凹陷包層內包層區域 30 所圍繞，該纖芯區域 10 包括  $\Delta_1$ ，而該凹陷包層內包層區域 30 包括  $\Delta_2$ 。內包層區域 20 則位於該纖芯區域 10 與該凹溝包層區域 30 之間，並由包括  $\Delta_3$  之該凹溝包層區域 30 所圍繞。該外包層區域 40 圍繞該凹溝區域 30。 $\Delta_4$  與  $\Delta_3$  之間的絕對差異為大約 0.4%，而與  $\Delta_5$  之間為大約 2%。在圖 5 繪示之具體實施例中，該第一包層區域 (2) 實質上為未摻雜二氧化矽，而該第二包層區域 (3) 為利用氮摻雜的二氧化矽。表 2 中所揭示的光纖具有包層 (60)，其具有大約  $125 \mu\text{m}$  的外直徑。

【0076】具有圖4之折射指數分佈的經製造光纖100具有在1310及1550nm下分別為8.8 $\mu$ m及9.7 $\mu$ m的MFD，具有1409nm的22m截止波長，具有在1550nm下為0.2dB/km的衰減，以及具有在小直徑心軸（4mm、5mm或6mm直徑（（2mm、2.5mm或3mm半徑））上的超低彎損（於1490nm下量測），如以下表6所示。表6指出當該光纖100以大約四分之一圈（舉例而言，參考圖1）彎曲成為一彎曲半徑 $r_b = 2$ mm時，該彎損將小於0.02dB（舉例而言，在1490nm波下量測）。更具體的，當該光纖100以大約四分之一圈彎曲成為一彎曲半徑 $r_b = 2$ mm時，預期該彎損係為0.01dB或小於0.01dB。

表6

圈數	總損失(dB)	2mm 半徑桿，每圈的損失(dB)
0.5	0.02	0.04
1	0.16	0.16
2	0.46	0.23
3	1.02	0.34
5	2.65	0.53
10	5.8	0.58
圈數		2.5mm 半徑桿，每圈的損失(dB)
0.5	0.13	0.26
1	0.24	0.24
2	0.43	0.22
3	0.62	0.21
5	1.15	0.23
10	2.2	0.22
圈數		3mm 半徑桿，每圈的損失(dB)
0.5	0.02	0.04
1	0.14	0.14
2	0.15	0.08
3	0.26	0.09

5	0.4	0.08
10	0.8	0.08

【0077】於此揭示之該光纖（100）可由保護塗層70圍繞，該保護塗層70圍繞該第二外包層60。該保護塗層70可以包括一次被覆層P，其接觸並圍繞該外包層區域60，該一次被覆層P具有小於1.0 MPa的楊氏模數，較佳的是小於0.9 MPa，而在某些具體實施例中不大於0.8 MPa，而在某些具體實施例中不大於0.5 MPa，而在某些具體實施例中不大於0.3 MPa，舉例而言為0.1至1 MPa，而在某些具體實施例中為0.1至0.5 MPa。該保護塗層70另外包括次級被覆層S，其接觸並圍繞該一次被覆層P，該次級被覆層S具有大於1200 MPa的楊氏模數，而在某些具體實施例中大於1400 MPa，舉例而言至少為1500 MPa，或至少為1600 MPa、至少1800 MPa或1400 MPa至2500 MPa或1500 MPa至2500 MPa。較低模數的一次被覆層（例如，<0.5 MPa）支持良好的微彎效能，而較高模數的次級被覆層（例如，>1500 MPa）即使在厚度減小時仍支持該次級被覆層的改善抗刺穿性。根據某些具體實施例，該次級被覆層S的外直徑不大於250 μm，舉例而言不大於242 μm（例如，≤225 μm、≤210 μm，或≤200 μm），舉例而言為175至242 μm，或175至225 μm，或180至200 μm。以上的光纖設計，即使在塗層直徑小於225 μm時仍達成良好的微彎及整體彎曲效能，其實現較小直徑、較低成本、較高光纖密度纜線，及具有優越的光學效能。

【0078】 當在此使用時，一次被覆層之固化聚合物材料的楊氏模數、斷裂伸長率與拉伸強度係使用拉力測試儀器（例如，Sintech MTS 拉力測試機或 INSTRON 通用材料測試系統），對於材料樣本進行量測，該材料樣本被塑形為厚度大約 0.003”（76  $\mu\text{m}$ ）及 0.004”（102  $\mu\text{m}$ ）及寬度大約 1.3 cm 的薄膜，其具有標距長度為 5.1 cm 以及 2.5 cm/min 的測試速度。

【0079】 在 PCT 的公開說明書 WO2005/010589 中，可以找到其他適宜的一次被覆層與次級被覆層的敘述，其透過引用而整體併入本文之中。

【0080】 於此揭示之該等光纖顯現出低偏極模色散（PMD）數值，特別是當利用外側氣相沈積（OVD）處理加以製造時。對於在此揭示的光纖而言，光纖的旋轉也可以降低 PMD 數值。

【0081】 要瞭解的是以上敘述僅為示例並預期提供由用於瞭解申請專利範圍所定義之該等光纖之本質及特徵的概述。包含該等附圖已提供對於較佳具體實施例的進一步瞭解，且其整合並構成本說明書的一部分。該等圖式描繪各種特徵與具體實施例，而與其敘述一起提供說明該等原則及操作。對於本領域技術人員顯而易見的是，在不背離申請專利範圍之精神與範圍下，可以對於在此敘述之該等較佳具體實施例進行各種修改。

#### 【符號說明】

#### 【0082】

7 矽光子晶片

7' 矽波導

7<sub>G</sub> 光柵

10 纖芯區域

20 內包層區域

30 凹陷包層區域

40 外包層區域

50 包層區域

60 外包層

70 塗層

100 光纖

**【生物材料寄存】**

**【0083】** 國內寄存資訊(請依寄存機構、日期、號碼順序註記)

無

**【0084】** 國外寄存資訊(請依寄存國家、機構、日期、號碼順序註記)

無



201816440

**【發明摘要】****【中文發明名稱】** 低彎損失的單模光纖**【英文發明名稱】** LOW BEND LOSS SINGLE MODE OPTICAL FIBER**【中文】**

一種光纖，包括：(i) 一纖芯區域，其包括一外半徑  $r_1$  與一相對折射指數  $\Delta_{1\max}$ ，而  $3.0 \leq r_1 \leq 7.0 \mu\text{m}$  且  $0.32\% \leq \Delta_{1\max} \leq 0.5\%$ ；(b) 圍繞該纖芯區域的一凹陷指數包層區域，其包括一外半徑  $r_3$  與一小於  $-0.2\%$  的相對折射指數  $\Delta_3$  以及一凹溝體積  $V_3$ ，其中  $45\% \Delta - \mu\text{m}^2 \leq |V_3| \leq 200\% \Delta - \mu\text{m}^2$ ；(c) 一第一外包層區域，其圍繞該凹陷指數包層區域並包括一相對折射指數  $\Delta_4$  與一外半徑  $r_4$ ；及 (d) 一第二外包層，其包括  $5\text{wt}\% - 20\text{wt}\%$  的二氧化鈦、一相對折射指數  $\Delta_5$ 、一厚度  $T_M$  以及一外半徑  $r_5$ ，其中  $3 \mu\text{m} \leq T_M \leq 30 \mu\text{m}$  且  $r_5 \leq 65 \mu\text{m}$ ；該光纖具有一模場直徑  $\text{MFD}_{1550}$ ，且  $8 \mu\text{m} \leq \text{MFD}_{1550} \leq 10.5 \mu\text{m}$ ，該光纖也具有在繞著  $2.5\text{mm}$  半徑心軸彎曲一圈時  $< 1550\text{nm}$  的截止波長，以及當使用  $2.5\text{mm}$  半徑心軸在  $1550\text{nm}$  下  $\leq 1.0\text{dB/turn}$  的彎損。

**【英文】**

An optical fiber comprising: (i) a core region comprising an outer radius  $r_1$ , and  $3.0 \leq r_1 \leq 7.0$  microns and a relative refractive index  $\Delta_{1\max}$  and  $0.32\% \leq \Delta_{1\max} \leq 0.5\%$ ; (b) a depressed index cladding region surrounding the core region comprising an outer radius  $r_3$  and a relative refractive index  $\Delta_3$  less than  $-0.2\%$ , and trench volume  $V_3$  wherein  $45\% \Delta\text{-micron}^2 \leq |V_3| \leq 200\% \Delta\text{-micron}^2$ ; (c) a first outer cladding region

surrounding the depressed index cladding region and comprising a relative refractive index  $\Delta_4$  and an outer radius  $r_4$ ; and (d) a second outer cladding layer comprising 5wt%-20wt% titania, a relative refractive index  $\Delta_5$ , and a thickness  $T_M$ , wherein  $3\text{micron} \leq T_M \leq 30\text{microns}$ , and outer radius  $r_5 \leq 65\text{microns}$ ; the optical fiber has a mode field diameter  $MFD_{1550}$  and  $8\text{microns} \leq MFD_{1550} \leq 10.5\text{microns}$ , a cutoff wavelength  $< 1550\text{nm}$  when bent 1 turn around a 2.5mm radius mandrel, and a bending loss at 1550nm when using a mandrel comprising a radius of 2.5mm of  $\leq 1.0\text{dB/turn}$ .

【指定代表圖】第 ( 2A ) 圖。

【代表圖之符號簡單說明】

- 1 0 纖 芯 區 域
- 2 0 內 包 層 區 域
- 3 0 凹 陷 包 層 區 域
- 4 0 外 包 層 區 域
- 5 0 包 層 區 域
- 6 0 外 包 層
- 7 0 塗 層

【特徵化學式】

無

## 【發明申請專利範圍】

【第1項】 一種光纖，包括：

一纖芯區域，其包括一外半徑  $r_1$  與一相對折射指數

$\Delta_{1\text{max}}$ ，而  $3.0 \leq r_1 \leq 7.0 \mu\text{m}$  且  $0.32\% \leq \Delta_{1\text{max}} \leq 0.5\%$ ；

一凹陷指數包層區域，其圍繞所述纖芯區域，所述凹陷指數包層區域包括一外半徑  $r_3$  與一小於  $-0.2\%$  的相對折射指數  $\Delta_3$  以及一凹溝體積  $V_3$ ，因此  $45\% \Delta - \mu\text{m}^2 \leq |V_3| \leq 200\% \Delta - \mu\text{m}^2$ ；及

一第一外包層區域，其圍繞所述凹陷指數包層區域，所述第一外包層區域包括一相對折射指數  $\Delta_4$  與一外半徑  $r_4$ ；及

一第二外包層，其具有一相對折射指數  $\Delta_5$ ，所述第二外包層包括利用  $5\text{wt}\% - 20\text{wt}\%$  的二氧化鈦所摻雜的二氧化矽基玻璃，並具有一厚度  $T_M$ ，因此  $3 \mu\text{m} \leq T_M \leq 30 \mu\text{m}$ ，所述第二外包層也具有不大於  $65 \mu\text{m}$  的外半徑  $r_5$ ；

其中所述光纖在  $1550\text{nm}$  下的模場直徑 ( $\text{MFD}_{1550}$ ) 為  $8.3 \mu\text{m} \leq \text{MFD}_{1550} \leq 10.5 \mu\text{m}$ ，所述光纖具有在繞著  $2.5\text{mm}$  半徑心軸彎曲一圈時  $< 1550\text{nm}$  的單模截止波長，在  $1550\text{nm}$  下為至少  $65 \mu\text{m}^2$  並小於  $85 \mu\text{m}^2$  的有效面積，以及當使用  $2.5\text{mm}$  半徑心軸進行心軸纏

繞測試時，在 1550 nm 下決定為  $\leq 1.0 \text{ dB/turn}$  的彎損。

【第2項】如請求項 1 所述之光纖，其中該光纖在 1550 nm 下顯現的彎損利用包括半徑為 2.5 mm 之心軸進行之心軸纏繞測試係被決定為  $\leq 0.55 \text{ dB/turn}$ ，且較佳為  $\leq 0.1 \text{ dB/turn}$ ，或甚至為  $\leq 0.01 \text{ dB/turn}$ 。

【第3項】如請求項 1 或請求項 2 所述之光纖，其中該纖芯區域的外半徑  $r_1$  為  $3.0 \leq r_1 \leq 6$ ，且  $70\% \Delta - \mu\text{m}^2 \leq |V_3| \leq 150\% \Delta - \mu\text{m}^2$ 。

【第4項】如請求項 1 或請求項 2 所述之光纖，其中  $80\% \Delta - \mu\text{m}^2 \leq |V_3| \leq 200\% \Delta - \mu\text{m}^2$ ，較佳為  $100\% \Delta - \mu\text{m}^2 \leq |V_3| \leq 150\% \Delta - \mu\text{m}^2$ 。

【第5項】如請求項 1 或請求項 2 所述之光纖，其中  $10 \mu\text{m} \leq r_5 \leq 63 \mu\text{m}$ ，且較佳為： $10 \mu\text{m} \leq r_5 \leq 50 \mu\text{m}$ ，或  $30 \mu\text{m} \leq r_5 \leq 62.5 \mu\text{m}$ 、 $10 \mu\text{m} \leq r_5 \leq 50 \mu\text{m}$ ，或  $30 \mu\text{m} \leq r_5 \leq 50 \mu\text{m}$ 。

【第6項】如請求項 1 或請求項 2 所述之光纖，其中該光纖具有小於 1550 nm 的 22 m 纜線截止波長。

【第7項】如請求項 1 或請求項 2 所述之光纖，其中所述第二外包層包括 5 至 15 wt% 的二氧化鈦，且  $5 \mu\text{m} \leq T_M \leq 15 \mu\text{m}$ 。

【第8項】如請求項 1 或請求項 2 所述之光纖，其中所

述在  $1550\text{ nm}$  的模場直徑 ( $\text{MFD}_{1550}$ ) 為  $9\text{ }\mu\text{m} \leq \text{MFD}_{1550} \leq 10\text{ }\mu\text{m}$ 。

【第9項】如請求項1或請求項2所述之光纖，其中該凹陷指數包層區域的  $\Delta_3$  為  $-0.2\% \leq \Delta_3 \leq -0.7\%$ ，且較佳的為  $-0.3\% \leq \Delta_3 \leq -0.5\%$ 。

【第10項】如請求項1或請求項2所述之光纖，其中纖芯區域包括  $\alpha$ ，且  $10 \leq \alpha \leq 100$ ，舉例而言， $1 \leq \alpha \leq 10$ 。

【第11項】如請求項1所述之光纖，其中該光纖顯現：

(I) 在  $1550\text{ nm}$  的  $\text{MFD} > 9\text{ }\mu\text{m}$ ；纜線截止波長大於  $1260\text{ nm}$  並小於  $1540\text{ nm}$ ；在  $2.5\text{ mm}$  半徑心軸下的彎損  $\leq 1\text{ dB/turn}$ ；在  $5\text{ mm}$  半徑心軸下的彎損  $< 0.5\text{ dB/turn}$ ，其中該彎損為整體彎損，並於  $1550\text{ nm}$  波長下量測；或

(II)  $1200\text{ nm} < \text{纜線截止波長} < 1540\text{ nm}$ ； $0.001\text{ dB/turn} < 2.5\text{ mm}$  彎曲半徑下的整體彎損  $< 0.55\text{ dB/turn}$ ； $0.001\text{ dB/turn} < 5\text{ mm}$  彎曲半徑下的整體彎損  $< 0.5\text{ dB/turn}$ ，其中該整體彎損係於  $1550\text{ nm}$  波長下量測。

【第12項】一種微光學裝置，包括：

a. 如請求項1或請求項2所述之光纖，所述光纖具

有被彎曲成  $\leq 5 \text{ m m}$  之彎曲半徑的光纖部分；及

b. 一矽光子晶片，其光學連接至所述光纖之彎曲部分。

【第 13 項】 如請求項 12 所述之微光學裝置，其中該光纖部分係被彎曲成具有  $\leq 3 \text{ m m}$  的彎曲半徑。

【第 14 項】 如請求項 12 所述之微光學裝置，其中該光纖部分係被彎曲成具有  $\leq 3 \text{ m m}$  的彎曲半徑。

【第 15 項】 如請求項 12 所述之微光學裝置，其中該光纖部分係被彎曲成彎曲半徑  $r_b$ ，因此  $2.5 \text{ m m} \geq r_b \geq 1 \text{ m m}$ 。





