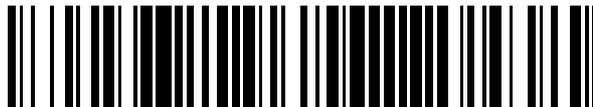


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 371 207**

51 Int. Cl.:
C03B 37/027 (2006.01)
C03B 37/029 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

- 96 Número de solicitud europea: **02796771 .0**
96 Fecha de presentación: **30.12.2002**
97 Número de publicación de la solicitud: **1578699**
97 Fecha de publicación de la solicitud: **28.09.2005**

54 Título: **PROCEDIMIENTO DE PRODUCCIÓN DE UNA FIBRA ÓPTICA CON BAJA DISPERSIÓN DE MODOS DE POLARIZACIÓN.**

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:
28.12.2011

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:
28.12.2011

73 Titular/es:
PRYSMIAN S.P.A.
VIALE SARCA 222
20126 MILANO, IT

72 Inventor/es:
COCCHINI, Franco y
MAZZOTTI, Andrea

74 Agente: **Carpintero López, Mario**

ES 2 371 207 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín europeo de patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Procedimiento de producción de una fibra óptica con baja dispersión de modos de polarización

La presente invención versa acerca de un procedimiento para producir una fibra óptica que tiene una baja dispersión de los modos de polarización.

5 Las señales ópticas transmitidas a través de fibras ópticas unimodales comprenden dos modos ortogonales de polarización que, en el caso de una fibra con un núcleo perfectamente cilíndrico de diámetro uniforme, se propagan a una velocidad común. Sin embargo, en las fibras ópticas reales la simetría cilíndrica del núcleo puede estar alterada debido a defectos de forma o a tensiones no uniformes. En consecuencia, puede acumularse una diferencia de fase entre los dos modos y se dice que la fibra muestra "birrefringencia". En particular, la birrefringencia
10 introducida por la forma y la asimetría interna por tensiones se denomina "birrefringencia lineal intrínseca".

Las irregularidades estructurales y geométricas de la fibra óptica que dan origen a la birrefringencia se originan típicamente en la propia preforma y son modificadas durante el procedimiento de estiramiento de la fibra. El procedimiento de estiramiento suele llevarse a cabo por medio de un aparato denominado "torre de estiramiento", partiendo de una preforma de vidrio. En la práctica, una vez que la preforma ha sido colocada en posición vertical y
15 ha sido calentada a una temperatura por encima del punto de ablandamiento dentro de un horno adecuado, el material fundido es estirado hacia abajo a una velocidad controlada de forma que se produzca un elemento filiforme que forma la fibra óptica en sí. En este procedimiento se introducen típicamente tensiones asimétricas en la fibra.

En una fibra birrefringente, los dos componentes del modo fundamental, inicialmente en fase entre sí, vuelven a estar en fase únicamente después de cierta longitud, denominada comúnmente "longitud de batido". En otras
20 palabras, la longitud de batido es el periodo de repetición de un cierto estado de polarización (suponiendo que la fibra mantenga una birrefringencia constante en toda su longitud).

En las denominadas "fibras con conservación de la polarización", se introduce la asimetría deliberadamente en la fibra para generar birrefringencia. Sin embargo, en las fibras ordinarias (es decir, en las que no tienen conservación de la polarización), la birrefringencia es perjudicial. De hecho, cuando se transmiten señales de impulsos por una
25 fibra óptica, la birrefringencia es una causa potencial de la dispersión del impulso, dado que los dos componentes de polarización excitados por los impulsos viajan a diferentes velocidades de grupo (es decir, se dispersan). Este fenómeno, denominado dispersión de los modos de polarización (PMD), ha sido muy estudiado en años recientes debido a su importancia en los sistemas de guías de luz amplificada periódicamente.

Típicamente, el fenómeno de la PMD lleva a una limitación de la anchura de la banda de transmisión de la señal y, en consecuencia, a una degradación del rendimiento de las fibras ópticas a lo largo de las cuales se transmiten
30 susodichas señales. Por lo tanto, el fenómeno es poco deseable en los sistemas de transmisión de señales a lo largo de fibras ópticas, especialmente en aquellos que operan a larga distancia, en los cuales es necesario minimizar cualquier forma de atenuación o de dispersión de las señales para garantizar rendimientos elevados en la transmisión y la recepción.

35 Para reducir la dispersión de los modos de polarización en la fibra óptica se ha propuesto girar la fibra durante el procedimiento de estiramiento para que se haga que la fibra se retuerza en torno a su eje longitudinal, con una deformación torsional resultante de la zona viscosa del material de fibra en el horno; esta deformación se fija en la fibra cuando la fibra pierde su estado viscoso por enfriamiento.

Debido al giro, se imprime en la fibra (y se fija en la misma) una rotación de los ejes de polarización de la fibra. En
40 consecuencia, cuando se transmiten impulsos ópticos por la fibra óptica, se propagan de forma alterna por los ejes de refringencia lento y rápido, compensando así la demora relativa y reduciendo la dispersión de los impulsos. Esto es equivalente a tener un índice local de refracción efectivo para los impulsos igual al índice medio de refracción en los dos ejes, haciéndose la media en la longitud del impulso a lo largo de la fibra.

En la presente descripción y en las reivindicaciones,

- 45 • con "giro aplicado" y "torsión aplicada" se quiere decir la torsión aplicada a la fibra por un aparato de giro durante el procedimiento de estiramiento para que se haga que la fibra gire en torno a su eje longitudinal;
- con "giro realmente aplicado" o "torsión realmente aplicada" se quiere decir la torsión aplicada efectivamente a la fibra durante el procedimiento de estiramiento obviando posibles efectos mecánicos, por ejemplo deslizamiento en la superficie de contacto entre la fibra y el aparato de giro;
- 50 • con "zona viscosa" se quiere decir una porción longitudinal del material vítreo de la fibra óptica que, en el horno, tiene una temperatura suficiente elevada como para estar en un estado viscoso;
- con "longitud de la zona viscosa" se quiere decir la longitud de dicha porción longitudinal en un estado viscoso, que sustancialmente corresponde a la longitud de la porción del horno comprendida entre su punto más caliente

y su punto de salida; por ejemplo, en un horno que comprenda una mufla superior, una mufla central que define una zona caliente y una mufla inferior, la longitud de la zona viscosa puede tomarse aproximadamente como la longitud de la porción del horno comprendida entre la parte central de la zona caliente y el extremo inferior de la mufla inferior;

- 5 • con “giro solidificado” o “torsión solidificada” se quiere decir la torsión permanentemente impresa en la fibra, cuando se enfría, durante el procedimiento de giro como consecuencia de la deformación torsional experimentada por la zona viscosa del material de fibra en el horno;
- con “giro máximo aplicado” o “torsión máxima aplicada” se quiere decir el valor máximo de la torsión aplicada;
- 10 • con “giro máximo solidificado” o “torsión máxima solidificada” se quiere decir el valor máximo de la torsión solidificada;
- con “detorsión” se quiere decir una torsión que tiene una dirección opuesta a la dirección de una torsión previa;
- con “una detorsión de al menos el 50%” se quiere decir una detorsión adaptada a impartir un desplazamiento angular igual a al menos la mitad del desplazamiento angular impartido por la torsión previa;
- 15 • con “recuperación” se quiere decir la proporción $(T_{apli} - T_{fij}) / T_{apli}$, en la que T_{apli} es la torsión máxima realmente aplicada y T_{fij} es la torsión máxima solidificada;
- con “giro sustancialmente sinusoidal” se quiere decir, según da a conocer el documento US 6 240 748, una función de giro en la que la magnitud del coeficiente de uno de sus componentes oscilatorios (el componente fundamental) domina la magnitud de los coeficientes de todos los demás componentes oscilatorios (los componentes secundarios), así como el coeficiente de cualquier componente constante. En términos
- 20 cuantitativos, la dominación ocurre cuando la magnitud del coeficiente del componente fundamental es al menos aproximadamente tres veces la magnitud del coeficiente de cada uno de los componentes secundarios y el coeficiente del componente constante. La magnitud de dichos coeficientes puede determinarse llevando a cabo un complejo análisis de Fourier de la función de giro usando técnicas convencionales bien conocidas en la técnica. Los documentos US 2001/0046358 y EP 0 729 919 dan a conocer la impartición alternativa a una fibra
- 25 óptica de un giro en el sentido de las agujas del reloj y de un giro en sentido contrario a las agujas del reloj en la dirección del avance dentro de un horno de estiramiento.

Galtarossa et al. proponen un enfoque analítico que permite la optimización del diseño de giro para reducir la dispersión de los modos de polarización. Afirman que, en ausencia de acoplamiento de polarización, un perfil de giro optimizado puede equilibrar los efectos de la birrefringencia lineal intrínseca para que la demora diferencial de grupos pueda ser obligada a ser periódica y, en consecuencia, a tener una amplitud limitada como función de la distancia. Con un conjunto fijado de parámetros que caracterizan una función de giro particular, encuentran analíticamente los valores correspondientes a una DGD periódica en un régimen determinista. El documento US 5 298 047 da a conocer que la PMD puede ser sustancialmente reducida si, durante el estiramiento de la fibra, se aplica torsión a la fibra, de modo que se imprima sobre la fibra un giro permanente (es decir, una deformación torsional permanente). La torsión es aplicada de tal modo que el giro impreso sobre la fibra tiene una helicidad alternante en el sentido de las agujas del reloj y en el sentido contrario a las agujas del reloj. Este documento afirma que las fibras en las que se ha impreso un giro inferior a 4 vueltas/metro no muestran comercialmente una reducción significativa en la PMD. Así, enseña a aplicar una torsión a la fibra de modo que el giro impreso (o solidificado) en la fibra es, en al menos una porción de la misma, superior a 4 vueltas/metro, preferentemente superior a 10 o incluso a 20 vueltas/metro.

El documento US 6 240 748 afirma que una función convencional de giro sinusoidal, como la dada a conocer por el documento US 5 298 047 anteriormente mencionado, es capaz de reducir la PMD únicamente para un número pequeño de longitudes de batido. Por ejemplo, el documento US 6 240 748 muestra que la función convencional de giro sinusoidal que tiene una amplitud de giro de 3 vueltas/metro y una frecuencia espacial f de 2 metro^{-1} , aunque obtiene un factor bajo de reducción de la PMD con una longitud de batido de aproximadamente un cuarto de metro, no mantiene esta reducción de la PMD para longitudes de batido mayores. Por lo tanto, el documento US 6 240 748 enseña a reducir la PMD en fibra óptica unimodal girando la fibra durante el procedimiento de estiramiento según una función de giro que tiene suficiente contenido armónico como para lograr un bajo nivel de PMD para fibras comerciales, para lo cual las longitudes de batido de las fibras, incluyendo las longitudes de batido de diferentes porciones de las fibras, son variables y, así, no son conocidas de antemano con facilidad. Ejemplos de funciones adecuadas de giro capaces de lograr bajos niveles de PMD para varias longitudes de batido incluyen las ondas sinusoidales moduladas en frecuencia y moduladas en amplitud. Sin embargo, el solicitante hace notar que las funciones de giro dadas a conocer por este último documento requieren el uso de un aparato de giro complejo y caro.

55 Además, el documento US 6 240 748 afirma que la función de giro empleada en la producción de una fibra y la función de giro resultante (solidificado) presente en la fibra acabada no son en general idénticas debido a efectos mecánicos, por ejemplo deslizamiento en la superficie de contacto entre la fibra y el aparato usado para aplicar la

función de giro a la fibra. Sin embargo, afirma que la correspondencia entre la función de giro aplicado por el aparato de giro y la función de giro resultante en la fibra es, en general, lo suficientemente buena como para alcanzar los beneficios de la invención dada a conocer en dicho documento.

5 En cambio, el solicitante ha hallado una nueva técnica para producir una fibra con baja PMD en la que hay una diferencia sustancial entre la función de giro aplicado y la función de giro "solidificado", aun en ausencia de dichos efectos mecánicos. Según esta técnica, se aplican una torsión y una detorsión de al menos el 50% a la zona viscosa del material de fibra mientras el material de fibra pasa por el horno.

10 El solicitante ha hallado que cuando se aplican tanto una torsión como una detorsión de al menos el 50% a la zona viscosa del material de fibra, se logra una reducción significativa de la PMD aunque la amplitud de la función de giro solidificado sea mucho menor que la amplitud de la función de giro aplicado realmente. Más en particular, a diferencia de la enseñanza del documento US 5 298 047 anteriormente mencionado, el solicitante ha hallado que en estas condiciones se logra una reducción significativa de la PMD aunque el giro máximo solidificado sea menor de 4 vueltas/metro. De hecho, el solicitante ha observado que es suficiente que el giro máximo aplicado en realidad sea mayor de 4 vueltas/metro.

15 Sin pretender estar atado a ninguna teoría, el solicitante cree que, cuando se aplica tal combinación de torsión y de una detorsión de al menos el 50%, se logra una reducción significativa de la PMD —con independencia de que el giro solidificado sea mucho menor que el giro aplicado— debido al hecho de que la torsión viscosa, experimentada en el horno por cada porción del material de fibra, afecta significativamente a las asimetrías geométricas de la fibra óptica y, así, la intensidad local de la birrefringencia (es decir, la longitud de batido local) de la misma. El solicitante cree que la torsión viscosa produce una dispersión de la intensidad de la birrefringencia a lo largo de la fibra óptica, de modo que diferentes porciones de la fibra óptica girada tienen diferentes valores de longitud de batido. Tal variación en la longitud de batido a lo largo de la fibra óptica girada con respecto a la fibra no girada aumenta muchísimo —aun en el caso de una función simple de giro sinusoidal— la mezcla entre los dos modos ortogonales de polarización, resultando en una reducción de la PMD. Así, el solicitante cree que la torsión viscosa afecta a las longitudes de batido a lo largo de la fibra, de modo que la reducción de la PMD se logra también en las fibras que tienen (cuando no están giradas) un gran número de longitudes de batido, aun en el caso de una función simple de giro sinusoidal.

20 En consecuencia, el solicitante cree que, cuando se aplican una torsión y una detorsión de al menos el 50% a la fibra en su estado viscoso, la PMD se reduce principalmente gracias a los efectos anteriormente mencionados de la torsión viscosa y solo en parte debido al efecto del giro solidificado.

En un primer aspecto, la presente invención versa acerca de un procedimiento para producir una fibra óptica que tiene una baja dispersión de los modos de polarización, según la reivindicación 1.

35 Para los fines de la presente invención, la condición de "torsión y una detorsión de al menos el 50% aplicadas a la zona viscosa" incluye tanto la condición en la que se aplican una torsión única y una detorsión única de al menos el 50% a la zona viscosa como la condición en la que se aplica un número mayor de torsiones y detorsiones a la zona viscosa, con la condición de que la última detorsión sea de al menos el 50%.

Además, dicha condición corresponde a la condición de seleccionar la frecuencia ν de la función de giro, la longitud L de la zona viscosa y la velocidad V de estiramiento para lograr una recuperación R de al menos 0,5.

Las reivindicaciones dependientes están relacionadas con realizaciones particulares de la invención.

40 Preferentemente, la frecuencia ν de la función de giro, la longitud L de la zona viscosa y la velocidad V de estiramiento son tales que se aplican tanto una torsión como una detorsión de al menos un 60% a la zona viscosa. Esta condición corresponde a la condición en la que la frecuencia ν de la función de giro, la longitud L de la zona viscosa y la velocidad V de estiramiento son tales como para lograr una recuperación R de al menos 0,6.

45 El solicitante cree que, con una recuperación de al menos el 50% (preferentemente, de al menos el 60%), el efecto de la torsión viscosa sobre la reducción de la PMD tiene más importancia que el efecto de la torsión solidificada. Además, el solicitante cree que una recuperación de al menos el 50% (preferentemente de al menos el 60%) permite que la PMD se reduzca significativa aunque el giro solidificado sea mucho menor que el giro aplicado.

50 Ventajosamente, la frecuencia ν de la función de giro, la longitud L de la zona viscosa y la velocidad V de estiramiento son tales que $1,2 \cdot L \leq V/\nu \leq 6,7 \cdot L$. El solicitante ha hallado que esto permite que se logre una recuperación de al menos un 50%. Preferentemente, $1,7 \cdot L \leq V/\nu \leq 3,3 \cdot L$. El solicitante ha hallado que esto permite que se logre una recuperación de al menos un 60%.

55 Ventajosamente, la frecuencia ν de la función de giro, la amplitud θ_0 de la función de giro y la velocidad V de estiramiento son tales que la torsión máxima aplicada es de al menos 4 vueltas/metro. Ventajosamente, la frecuencia ν de la función de giro, la amplitud θ_0 de la función de giro y la velocidad V de estiramiento son tales que la torsión máxima solidificada es de no más de 4 vueltas/metro.

Ventajosamente, la amplitud θ_0 de la función de giro (en vueltas) es tal que $(2V) / (V\pi) \leq \theta_0 \leq (2V) / [v\pi (1-R)]$, siendo R la recuperación, siendo V la velocidad de estiramiento (en metros/segundo) y siendo v la frecuencia de la función de giro (en Hz). Esto hace que la torsión máxima aplicada sea de al menos 4 vueltas/metro y que la torsión máxima solidificada no sea mayor de 4 vueltas/metro.

- 5 Ahora se ilustrarán las características y las ventajas de la invención con referencia a realizaciones representadas como un ejemplo no limitante en los dibujos adjuntos, en los cuales:
- la Figura 1 muestra una torre de estiramiento que puede ser usada en el procedimiento de la presente invención;
 - 10 • la Figura 2 es una representación esquemática (y no a escala) del procedimiento de formación de una fibra óptica a partir de una preforma óptica dentro de un horno, que es parte de la torre de estiramiento de la Figura 1;
 - la Figura 3 muestra la torsión máxima aplicada (como la línea recta continua) y los resultados experimentales para la torsión máxima solidificada (como cuadrados negros) en función de la frecuencia v de giro, obtenido con una función de giro sinusoidal que tiene una amplitud de 5 vueltas y una velocidad de estiramiento de 2 m/s;
 - 15 • la Figura 4 muestra la recuperación correspondiente a los resultados de la Figura 3 en función de la proporción $V/(vL)$;
 - la Figura 5 muestra el giro T solidificado (normalizado a $2\pi\theta_0/L$) en función de la frecuencia v de la función de giro (normalizada a V/L) con diversos valores k (estando definida k después en la descripción), según se obtiene mediante simulaciones numéricas;
 - 20 • la Figura 6 muestra los valores de la cantidad total máxima y mínima del giro viscoso experimentado por un volumen pequeño de vidrio que se desplaza en un horno, en el caso de $k = 2$, según se obtiene mediante simulaciones numéricas.

Con referencia a la Fig. 1, una torre 1 de estiramiento comprende una pluralidad de dispositivos que están sustancialmente alineados en un eje vertical 2 de estiramiento (de ahí el término "torre").

- 25 En detalle, la torre 1 comprende un horno 6 para llevar a cabo una fusión controlada de una porción extrema inferior de una preforma 3 (también denominada estrangulamiento de la preforma), un dispositivo 7 de alimentación para soportar la preforma 3 y alimentarla al horno 6 desde arriba, un dispositivo 8 de tracción (en un extremo inferior de la torre) para traccionar la fibra 4 de la preforma 3 y un dispositivo 9 de enrollamiento para almacenar la fibra 4 en un carrete (no mostrado).

- 30 Típicamente, el material de fibra de la preforma 3 de vidrio comprende SiO_2 y GeO_2 .

El horno 6 puede ser de cualquier tipo convencional diseñado para producir una fusión controlada de la preforma. El horno 6 puede comprender, por ejemplo (como se describe mejor en lo que sigue), una mufla superior, una mufla central dotada de un serpentín calentador y que define una zona caliente del horno 6 y una mufla inferior.

- 35 Preferentemente, se sitúa debajo del horno 6 un dispositivo 12 de enfriamiento, por ejemplo de un tipo que tiene una cavidad de enfriamiento diseñada para hacerla pasar por un flujo de gas de enfriamiento, para enfriar la fibra 4 que sale de él. El dispositivo 12 de enfriamiento está dispuesto coaxial con el eje 2 para que la fibra 4 que sale del horno 4 pueda pasar a través del mismo.

- 40 La torre 1 también puede estar dotada de un dispositivo 13 de monitorización de la tensión (por ejemplo, del tipo descrito en la patente estadounidense 5.316.562) y de un detector 14 de diámetro de un tipo conocido, situado preferentemente entre el horno 6 y el dispositivo 12 de enfriamiento, para medir la tensión y el diámetro de la fibra 4, respectivamente.

- 45 Preferentemente, la torre 1 de estiramiento comprende además unos dispositivos 15, 16 primero y segundo de revestimiento de un tipo conocido, colocados debajo del dispositivo 12 de enfriamiento en la dirección vertical de estiramiento y diseñados para depositar sobre la fibra 4, según pasa a través de los mismos, un primer revestimiento protector y un segundo revestimiento protector, respectivamente. Cada dispositivo 15, 16 de revestimiento comprende, en particular, una senda unidad 15a, 16a de aplicación que está diseñada para aplicar sobre la fibra 4 una cantidad predefinida de resina y una senda unidad 15b, 16b de curado, por ejemplo un horno de lámpara UV, para curar la resina, proporcionando así un revestimiento estable.

- 50 El dispositivo 8 de tracción puede ser del tipo de polea simple o de polea doble. En la realización ilustrada, el dispositivo 8 de tracción comprende una polea (o "cabrestante") simple 18 movida por motor que está diseñada para estirar la fibra 4, ya recubierta, en la dirección vertical de estiramiento. El dispositivo 8 de tracción puede estar dotado de un sensor 19 de velocidad angular que está diseñado para generar una señal que indica la velocidad angular de la polea 18 durante su operación. La velocidad de rotación de la polea 18 y, por lo tanto, la velocidad V

de estiramiento de la fibra 4 pueden hacerse variar durante el procedimiento, por ejemplo como respuesta a una variación de diámetro detectada por el detector 14.

Se proporcionan ventajosamente una o más poleas 31 (o miembros de guiado de otros tipos) para guiar a la fibra 4 desde el dispositivo 8 de tracción hasta el dispositivo 9 de enrollamiento.

- 5 Además, puede proporcionar un dispositivo de control de la tensión (no mostrado), tal como una "bailarina", para regular la tensión de la fibra durante el enrollamiento.

El dispositivo 9 de enrollamiento es de un tipo conocido.

- 10 La torre 1 de estiramiento puede comprender, además, una unidad de control (no mostrada) conectada eléctricamente a todos los dispositivos, sensores y detectores presentes a lo largo de la torre 1 para ser controlados desde el exterior.

En último lugar, la torre 1 de estiramiento comprende, además, un aparato 20 de giro, colocado entre los dispositivos 15, 16 de revestimiento y un dispositivo 8 de tracción, para impartir un giro a la fibra 4 en torno a su eje longitudinal durante el estiramiento.

- 15 Según el procedimiento de la invención, el aparato 20 de giro está adaptado para impartir un giro sustancialmente sinusoidal a la fibra. En el documento US 6 324 872 se describe un ejemplo del aparato de giro que puede ser usado en el procedimiento de la invención.

De manera alternativa, el aparato de giro puede estar integrado en uno de los dispositivos 15, 16 de revestimiento (preferentemente en el primer dispositivo 15 de revestimiento), tal como se describe en el documento US 6 189 343.

La torre 1 de estiramiento funciona como sigue.

- 20 El dispositivo 7 de soporte alimenta la preforma 3 al horno 6, en el que se funde una porción inferior de la misma (el estrangulamiento). La fibra 4 estirada del estrangulamiento es traccionada hacia abajo del dispositivo 8 de tracción y enrollada en un carrete por el dispositivo 9 de enrollamiento.

- 25 A medida que se estira la fibra 4, los sensores 13 y 14 monitorizan su tensión y su diámetro. Tal monitorización puede usarse para controlar el procedimiento de estiramiento, por ejemplo operando la velocidad de estiramiento. Cuando sale del horno 6, la fibra 4 es enfriada por el dispositivo 12 de enfriamiento y es recubierta con dos capas protectoras por los dispositivos 15, 16 de revestimiento.

Durante el estiramiento, el aparato 20 de giro aplica un giro sustancialmente sinusoidal a la fibra. Este giro sustancialmente sinusoidal puede ser descrito por la siguiente función de giro:

$$\theta = \theta_0 \cos(2\pi vt) \quad (1)$$

- 30 en la que v es la frecuencia de la función de giro medida en hercios, t es el tiempo medido en segundo y θ_0 es la amplitud de la función de giro medida en vueltas que denota el ángulo de rotación de la fibra óptica medida con respecto a un punto fijo de referencia.

La velocidad angular en el aparato 20 de giro se describe por la derivada de tiempo de la Ecuación (1), es decir, por $d\theta/dt$. Por lo tanto, la velocidad angular máxima de la fibra en el aparato 20 de giro es

$$\Omega = 2\pi v\theta_0 \quad (2)$$

- 35 El máximo giro T aplicado se mide en vueltas/m y está descrito por la proporción entre la velocidad angular máxima y la velocidad V de estiramiento:

$$T = \Omega/V = 2\pi v\theta_0/V \quad (3)$$

Según la invención, la frecuencia v de la función de giro, la longitud L de la zona viscosa de la fibra y la velocidad V de estiramiento son tales que cada porción de la fibra óptica —mientras está en el estado viscoso en el horno 6— experimenta primero una torsión y, después, una detorsión de al menos un 50%.

- 40 Además, preferentemente, la frecuencia v de la función de giro, la amplitud θ_0 de la función de giro y la velocidad V de estiramiento son tales que la torsión máxima aplicada (véase la Ecuación 3) es de al menos 4 vueltas/metro. Además, ventajosamente, la frecuencia v de la función de giro, la amplitud θ_0 de la función de giro y la velocidad V de estiramiento son tales que la torsión máxima solidificada no es mayor que 4 vueltas/metro. Es decir, se satisface ventajosamente la siguiente relación: $(2V) / (v\pi) \leq \theta_0 \leq (2V) / [v\pi (1 - R)]$, en la que R es la recuperación (definida más arriba en la descripción).

Típicamente, la velocidad V de estiramiento es de al menos 5 m/s.

5 Típicamente, la velocidad V de estiramiento no es mayor de 20 m/s. Típicamente, la tensión de estiramiento es de al menos 40 gr. Típicamente, la tensión de estiramiento no es mayor de 400 gr. Típicamente, la longitud L de la zona viscosa es de al menos 0,3 m. Típicamente, la longitud L de la zona viscosa no es mayor de 2 m. Típicamente, la frecuencia ν es de al menos 1. Típicamente, la frecuencia ν no es mayor de 10 Hz. Típicamente, la amplitud θ_0 de la función de giro es de al menos 2 vueltas. Típicamente, la amplitud θ_0 de la función de giro no es mayor de 10 vueltas.

10 Cuando es girada, la fibra 4 transmite una correspondiente torsión corriente abajo y corriente arriba. Corriente arriba, la torsión es transmitida al estrangulamiento de la preforma para que el material vítreo de fibra, que está en el estado viscoso en el horno 6, experimento una deformación torsional viscosa. Según se ha afirmado previamente, según el procedimiento de la invención, cada porción del material vítreo de fibra —mientras está en el estado viscoso en el horno 6— experimenta tanto una torsión como una detorsión de al menos el 50%. La deformación torsional resultante de la torsión y la detorsión de al menos un 50% queda entonces solidificada en cada porción correspondiente de la fibra óptica 4 cuando enfría la fibra. Por otra parte, corriente abajo, la torsión es transmitida elásticamente a la fibra enrollada 4. Sin embargo, gracias a la función de giro sustancialmente sinusoidal, que imparte alternativamente a la fibra una torsión en el sentido de las agujas del reloj y en sentido contrario a las agujas del reloj, la fibra enrollada 4 está sustancialmente libre de deformación elástica torsional.

20 El solicitante ha hallado que, cuando se aplican tanto una torsión como una detorsión de al menos el 50% a cada porción de la fibra óptica mientras está en el estado viscoso en la torre 1 de estiramiento, el giro solidificado es mucho menor que el giro realmente aplicado y que, a pesar de eso, se logra una reducción significativa de la PMD.

La Fig. 2 muestra esquemáticamente, con orientación horizontal por conveniencia, el horno 6, la fibra óptica 4 según es estirada desde el estrangulamiento de la preforma, indicado con 3a, y los perfiles de temperatura (a lo largo del eje 2) dentro del horno 6 y de la fibra 4. Una flecha muestra la dirección de avance (de izquierda a derecha) de la fibra 4.

25 En la realización mostrada, el horno 6 comprende una mufla superior 6a, una mufla central 6b, rodeada por un serpentín calentador 6c, y una mufla inferior 6d. El diagrama de temperaturas muestra el perfil de temperatura de las paredes internas del horno, indicado con T_{horno} . La región de la mufla central 6b rodeada por el serpentín calentador 6c define una zona caliente del horno 6, cuya longitud se indica con w . Dentro de la zona caliente, la temperatura T_{horno} tiene un máximo y al material del estrangulamiento se funde, permitiendo así el estiramiento del mismo.

30 La fibra 4 tiene, cuando se forma dentro del horno 6, una zona viscosa 4a (representada en color gris), es decir, una porción longitudinal en la que la temperatura es tan elevada que el material de vidrio está en estado viscoso. En particular, en la zona viscosa 4a, la temperatura de la fibra 4, indicada con T_{fibra} , es más elevada que una temperatura del umbral viscoso T_{viscosa} (representada por una línea horizontal en el diagrama de temperaturas). Puede apreciarse que el perfil de temperatura de la fibra 4 tiene un máximo en la zona caliente del horno 6 y disminuye progresivamente en la mufla inferior 6d. La zona viscosa 4a de la fibra 4 se extiende sustancialmente desde un punto en el extremo inferior del estrangulamiento 3a, en el que el material fundido tiene un diámetro que es insuficiente para resistir, sin deformarse, ante las fuerzas típicas de giro (siendo este diámetro, no mostrado en aras de la claridad en la Fig. 2, aproximadamente el doble del diámetro de la fibra final), hasta un punto de la fibra 4 en el que la temperatura T_{fibra} se hace menor que la temperatura del umbral viscoso T_{viscosa} . Sobre este último punto, la temperatura de la fibra 4 está por debajo de la temperatura del umbral viscoso T_{viscosa} y la viscosidad de la fibra 4 es tan elevada que ya no se permite la torsión viscosa.

45 El solicitante ha verificado que la longitud de la zona viscosa 4a, indicada con L en la Fig. 2, es típicamente ligeramente inferior a la distancia entre el centro de la zona caliente del horno 6 y el punto de salida del horno 6, que, en este caso, corresponde al extremo inferior de la mufla inferior 6d. En aras de la simplicidad, la longitud L de la zona viscosa puede ser aproximada perfectamente con esa distancia.

En el caso de un material de fibra de vidrio convencional de sílice, la temperatura T_{horno} en la zona caliente del horno 6 es típicamente de al menos aproximadamente 1800°C. Típicamente, dicha temperatura T_{horno} no es mayor de 2200°C. Además, la temperatura del umbral viscoso T_{viscosa} es típicamente de al menos 1600°C.

Ejemplos

50 En un primer experimento, el solicitante estiró una preforma de vidrio usando una torre de estiramiento como la mostrada en la Fig. 1.

Se usó una preforma de sílice con la porción central dopada con germanio.

55 La temperatura usada para calentar la preforma del estrangulamiento fue de 1800°C, la tensión de estiramiento fue de aproximadamente 300 gr, la amplitud θ_0 de la función de giro fue de aproximadamente 5 vueltas, la velocidad V de estiramiento fue de 2 m/s y la frecuencia ν de la función de giro fue establecida en diversos valores que oscilaban

entre 0,25 y 1,75 Hz. Se aproximó la longitud L de la zona viscosa de la fibra con la distancia entre el centro de la zona caliente del horno 6 y la zona inferior de la mufla inferior 6d, que, en este caso, fue de 1 m.

Se grabó un surco longitudinal en la preforma para tener una referencia visual de la rotación angular del vidrio y para permitir que el giro solidificado en la fibra estirada fuera fácilmente detectado en el microscopio.

- 5 Los resultados experimentales logrados para la torsión máxima solidificada en función de la frecuencia ν de giro se muestra en la Fig. 3 como cuadrados negros, mientras que la torsión máxima aplicada en función de la frecuencia ν de giro (dada por la Ecuación 3) se muestra en la Fig. 3 como una línea recta continua.

10 En el mismo experimento, se trató debidamente la señal del detector 14 del diámetro según la enseñanza del documento WO 0133184 (o de F. Cocchini et al. "On-line fiber spinning monitoring for low PMD optical fibers", Actas del 49º IWCS (2000)) para obtener tanto un espectro de potencia de esa señal como un valor que indicara la torsión impartida. El espectro de potencia resultó que era estable durante el giro, y la torsión impartida realmente a la fibra resultó que estaba de acuerdo con la torsión aplicada. Se dedujo, así, que no había efectos mecánicos, por ejemplo deslizamiento, en la superficie de contacto entre la fibra óptica y el aparato de giro. Por lo tanto, la torsión aplicada fue transferida por completo a la fibra (es decir, la torsión aplicada fue sustancialmente igual a la torsión realmente aplicada).

A pesar de la ausencia de dichos efectos mecánicos, en la Fig. 3 es evidente una marcada diferencia entre la torsión aplicada y la torsión solidificada. Más en particular, la diferencia entre la torsión aplicada y la torsión solidificada es muy pequeña con valores bajos de la frecuencia ν , mientras que aumenta con valores crecientes de la frecuencia ν , con una diferencia máxima a aproximadamente 1 Hz.

- 20 La Fig. 4 muestra la recuperación (según es definida más arriba en la descripción) extrapolada de los resultados de la Fig. 3 en función de la proporción $V/(vL)$.

Como resulta evidente en la Fig. 4, la recuperación es igual o mayor del 50% para aproximadamente $1,2 \leq V/(vL) \leq 6,7$. Además, la recuperación es igual o mayor del 60% para $1,7 \leq V/(vL) \leq 3,3$.

- 25 Cuando se satisface tal relación entre ν , V y L , la fibra que avanza —mientras está en el estado viscoso a lo largo del horno 6— experimenta tanto una torsión como una detorsión de al menos el 50% o el 60%, por lo que la torsión aplicada es parcialmente eliminada por la detorsión y el giro solidificado resultante resulta que es mucho menor que el aplicado.

En un segundo experimento, el solicitante estiró una preforma de vidrio usando una torre de estiramiento como la mostrada en la Fig. 1. Los parámetros del procedimiento fueron los mismos del primer experimento.

- 30 Se estiraron varios kilómetros de fibra, ya fuera sin giro (como ejemplo comparativo) o con giro a 0,5, 1 y 1,5 Hz. Se midió la PMD en longitudes de fibra de 1 Km enrolladas con una tensión de cero con una técnica de exploración de la longitud de onda. Los resultados se muestran en la Tabla 1.

Condición	PMD ps/Km ^{1/2}
No girada	0,133
No girada	0,226
$\nu = 0,5 \text{ Hz} - V/(vL) = 4$	0,050
$\nu = 1,0 \text{ Hz} - V/(vL) = 2$	0,059
$\nu = 1,5 \text{ Hz} - V/(vL) = 1,33$	0,054

- 35 Se logró una reducción significativa de la PMD para las tres muestras con giro con respecto a las muestras de referencia sin giro, con independencia de la marcada diferencia obtenida entre la torsión aplicada y la torsión solidificada (véanse las Figuras 3 y 4).

- 40 En un tercer experimento, el solicitante estiró una preforma de vidrio usando una torre de estiramiento como la mostrada en la Figura 1. Los parámetros del procedimiento fueron los mismos del primer experimento, salvo en la frecuencia ν de la función de giro, que fue establecida en valores que oscilaban entre 3 y 8 Hz, y la velocidad V de estiramiento, que fue de 12 m/s (es decir, la proporción $V/(vL)$ estuvo comprendida entre 1,5 y 4). La frecuencia de la función de giro, la longitud de la zona viscosa y la velocidad de estiramiento fueron tales que cada tramo de la fibra óptica —mientras estuvo en el estado viscoso a lo largo del horno 6— experimentó tanto una torsión como una detorsión de al menos el 50%.

Se estiraron varios kilómetros de fibra, ya fuera sin giro, como ejemplos comparativos, o con giro. Se midió la PMD en longitudes de fibra de 1 Km enrolladas con una tensión de cero con una técnica de exploración de la longitud de onda.

- 5 En este experimento, resultó que el giro solidificado estaba siempre por debajo de 4 vueltas/metro. Además, se encontró que los valores de la PMD para las fibras giradas a 3 y 4 Hz estaban siempre por debajo de 0,1 ps/Km^{1/2}, mientras que se encontró que los valores medios de la PMD para las fibras no giradas no eran menores de 0,15 ps/Km^{1/2}.

Por lo tanto, gracias al procedimiento de la invención, se redujo significativamente la PMD aun con valores de giro solidificado por debajo de 4 vueltas/metro.

- 10 El solicitante llevó a cabo simulaciones numéricas para calcular el giro solidificado en el caso de una función aplicada de giro sinusoidal. Según el modo usado por el solicitante, un par constante, M, aplicado a la fibra produce una velocidad angular ω , como función de z, según la siguiente relación:

$$M = \frac{\pi}{2} R^4 \mu \frac{\partial \omega}{\partial z} \quad (4)$$

- 15 La zona viscosa de la fibra, en la que puede encontrarse un cambio viscoso apreciable de ω , está modelada como un barril de radio R constante, que se mueve a lo largo de z a una velocidad constante (la velocidad V de estiramiento). El barril tiene un comportamiento puramente viscoso cuando $0 < z < L$ (teniendo una viscosidad μ y una densidad ρ) y un comportamiento elástico (rígido) para $z > L$. El barril está constreñido en $z = 0$ para evitar la rotación axial, mientras se hace girar a la parte elástica a una velocidad angular Ω .

- 20 La ecuación que gobierna la dependencia de la velocidad angular $\omega(z)$ se obtiene igualando la tasa de la variación del par a lo largo de z a la tasa de la variación del momento cinético en el tiempo. El par es dado por la Ec. (4). Para dar cuenta del movimiento total a lo largo de z, la variación de la tasa en el tiempo contiene también el término convectivo $V\partial/\partial z$. Por lo tanto, para la parte viscosa ($0 < z < L$), se logra la siguiente relación:

$$\frac{\partial^2(\omega/\Omega)}{\partial(z/L)^2} = k \left(\frac{\partial(\omega/\Omega)}{\partial(tV/L)} + \frac{\partial(\omega/\Omega)}{\partial(z/L)} \right) \quad (5)$$

con las condiciones límite $\omega = 0$ a $z = 0$ y $\omega = \Omega$ a $z = L$ y con el parámetro adimensional k igual a la proporción $\rho VL/\mu$, en la que ρ es la densidad del material de fibra y μ es la viscosidad del material de fibra en la zona viscosa. La viscosidad μ depende de la temperatura de calentamiento usada en el horno.

- 25 En el caso de la constante Q (correspondiente a $k = \infty$), las derivadas de tiempo se van y se obtienen la siguiente evolución de la velocidad a lo largo de z y el siguiente ángulo ϕ a lo largo de z:

$$\frac{\omega}{\Omega} = \frac{\exp(kz/L) - 1}{\exp(k) - 1} \quad (6)$$

$$\frac{\phi V}{\Omega L} = \frac{1 - \exp(kz/L) + kz/L}{k[1 - \exp(k)]} \quad (7)$$

La torsión T solidificada (vueltas/metro) es la derivada en z del ángulo ϕ , at $z=L$. Tal derivada en la parte izquierda de la Ec. 7 resulta que es siempre $1/L$. Por lo tanto, en el caso de una Ω constante, $T = \Omega/V$.

- 30 En el caso de un giro alternante (es decir, en el caso de $\Omega(t) = 2\pi\nu\theta(t)$ y $\theta(t)$ dados en la Ec. (1)), puede obtenerse una solución analítica para la torsión T solidificada usando, por ejemplo, el paquete de soporte lógico vendido por Wolfram Research, Inc. (Champaign, Illinois), con el nombre comercial MATHEMATICA.

La Fig. 5 muestra los resultados así logrados para el máximo giro T solidificado (normalizado a $2\pi\theta_0/L$) como función de la frecuencia ν (normalizada a V/L), con diversos valores k. Se supuso una amplitud constante θ_0 de la función de giro.

- 35 En la Fig. 5, para $k = \infty$, correspondiente al caso en el que la viscosidad μ es igual a cero, el giro máximo solidificado es igual al giro máximo aplicado (línea rectada dada por la Ecuación 3 mencionada más arriba). Las líneas para $k < \infty$ corroboran los resultados experimentales de la Fig. 2. De hecho, muestran que la diferencia entre la torsión aplica y la torsión solidificada es sustancialmente nula para valores pequeños de $\nu L/V$, mientras que aumenta con valores crecientes de $\nu L/V$, con una diferencia máxima con cierto valor de $\nu L/V$. Por ejemplo, para $k = 1$, hay una diferencia

máxima para vL/V igual a aproximadamente 0,7. Para $k = 0,1$ se logra una recuperación del 100% cuando la frecuencia espacial V/v del giro es igual a L , es decir, cuando cada porción de fibra óptica experimenta una torsión completa en el sentido de las agujas del reloj y una torsión completa en sentido contrario a las agujas del reloj (una torsión y una detorsión del 100%) mientras está en el estado viscoso. La línea para $k = 1$ es la que mejor describe el patrón de los resultados experimentales de la Fig. 2.

Mediante el mismo modelo, el solicitante llevó a cabo simulaciones numéricas para derivar la cantidad total de giro viscoso experimentado por un volumen pequeño de vidrio que se desplaza en un horno y que tiene un comportamiento viscoso para $0 < z < L$, definido como

$$T_{\text{viscosa}}(t_0) = \int_{t_0}^{t_0+L/V} \left| \frac{\partial \omega(z,t)}{\partial z} \right|_{z=V(t-t_0)} dt$$

siendo ω la velocidad angular, siendo t_0 el instante en el que el pequeño volumen de vidrio entra en la zona viscosa en $z = 0$, y se usó el valor absoluto debido al hecho de que la rotación viscosa actúa en las asimetrías geométricas de la fibra con independencia de la dirección en el sentido de las agujas del reloj o en la dirección contraria a las agujas del reloj. Los valores de las cantidades máxima y mínima de giro viscoso (que ocurren con un valor específico de t_0 , es decir, con valores específicos de la fase entre el tiempo de desplazamiento en la zona viscosa y la función de giro) en función de la proporción vL/V están documentados en la Fig. 6, en el caso de $k = 2$.

El solicitante ha verificado también que la técnica de giro de la presente invención causa una reducción de la ovalidad del revestimiento. Este cambio de la ovalidad del revestimiento refleja cambios que ocurren también en la ovalidad del núcleo, que afectan la birrefringencia local de la fibra. Dado que los ejes principales de la ovalidad del revestimiento coinciden con los de la ovalidad del núcleo, estos cambios no siempre son congruentes.

Además, el solicitante hace notar que, según se muestra en la Fig. 6, cada porción de fibra óptica experimenta un giro viscoso total que puede oscilar entre un valor máximo y uno mínimo. Por lo tanto, las diversas porciones de la fibra óptica experimentan diferentes reducciones de la ovalidad del revestimiento.

Este último hecho, junto con la incidencia de una relación aleatoria entre la ovalidad del revestimiento y del núcleo, produce una dispersión de la intensidad de la birrefringencia a lo largo de toda la fibra óptica. Es decir, diferentes porciones de la fibra óptica tendrán diferentes valores de la longitud de batido. Según el solicitante, tales variaciones de la longitud de batido a lo largo de la fibra óptica girada con respecto a la fibra óptica no girada permiten que aumente muchísimo la mezcla entre los dos modos ortogonales de polarización (y, así, que se reduzca la PMD), también en fibras que tienen (como las no giradas) un gran número de longitudes de batido, aun en el caso de una función simple de giro sinusoidal.

El solicitante hace notar que en las técnicas de giro dadas a conocer por la técnica anterior, la frecuencia de la función de giro, la longitud de la zona viscosa y la velocidad de estiramiento son tales que hay una correspondencia sustancialmente de uno a uno entre el giro aplicado realmente y el giro solidificado. En consecuencia, en las técnicas de la técnica anterior, la reducción de la PMD es debida principalmente al giro solidificado, es decir, a la rotación de los ejes de birrefringencia permanentemente impresa sobre la fibra.

Por el contrario, según la invención, la frecuencia de la función de giro, la longitud de la zona viscosa y la velocidad de estiramiento son tales que cada porción de la fibra óptica experimenta, a lo largo de la zona viscosa, tanto una torsión como una detorsión de al menos el 50%. De esta forma, la torsión aplicada es quitada en parte por la detorsión aplicada, y la giro solidificado resultante es mucho menor que el aplicado. Así, según la invención, se logra una reducción significativa de la PMD principalmente gracias al efecto del giro viscoso experimentado por cada porción de la fibra óptica mientras pasa por el horno. De hecho, como se ha afirmado más arriba, el solicitante cree que el giro viscoso reduce la asimetría del núcleo de fibra y dispersa la intensidad de la birrefringencia a lo largo de toda la fibra óptica.

Una fibra óptica obtenible mediante el procedimiento de fabricación de la presente invención puede ser cableada para su uso en sistemas ópticos de comunicaciones. Por lo tanto, puede producirse un cable óptico que comprende al menos una fibra óptica, según es obtenible mediante el procedimiento de fabricación de la presente invención.

REIVINDICACIONES

1. Un procedimiento para producir una fibra óptica (4) que tiene una baja dispersión de los modos de polarización que comprende las etapas de:
 - a) proporcionar una preforma (3) de fibra óptica de material vítreo;
 - 5 b) calentar el material vítreo de una porción extrema de la preforma (3) de fibra óptica en un horno (6);
 - c) estirar el material vítreo calentado a una velocidad V de estiramiento para formar una fibra óptica (4), teniendo cada porción del material vítreo estirado una zona viscosa (4a) cuando pasa por el horno (6);
 - d) aplicar a la fibra óptica un giro sustancialmente sinusoidal, que es transmitido a la zona viscosa;
- 10 **caracterizado porque** la etapa d) se lleva a cabo aplicando tanto una torsión y una detorsión de al menos el 50% a la zona viscosa de cada porción del material vítreo estirado que pasa por el horno (6).
2. Un procedimiento según la reivindicación 1 en el que la frecuencia v de la función de giro, la longitud L de la zona viscosa y la velocidad V de estiramiento son tales que $1,2 \cdot L \leq V/v \leq 6,7 \cdot L$.
3. Un procedimiento según las reivindicaciones 1 o 2 en el que la etapa d) se lleva a cabo aplicando tanto una torsión y una detorsión de al menos el 60% a la zona viscosa de cada porción del material vítreo estirado que pasa por el horno (6).
- 15 4. Un procedimiento según la reivindicación 3 en el que la frecuencia v de la función de giro, la longitud L de la zona viscosa y la velocidad V de estiramiento son tales que $1,7 \cdot L \leq V/v \leq 3,3 \cdot L$.
5. Un procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4 en el que, en la etapa d), la torsión máxima aplicada es de al menos 4 vueltas/metro.
- 20 6. Un procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5 en el que la torsión máxima solidificada es de no más de 4 vueltas/metro.
7. Un procedimiento según la reivindicación 6, cuando depende de la reivindicación 5, en el que, en la etapa d), el giro sinusoidal subsiguiente es aplicado con una amplitud θ_0 (en vueltas) de la función de giro que satisface la siguiente relación: $(2V) / (v\pi) \leq \theta_0 \leq (2V) / [v\pi(1-R)]$, en la que V es la velocidad de estiramiento (en metros/segundo), v es la frecuencia de la función de giro (en Hz), R es la proporción $(T_{apli} - T_{fij}) / T_{apli}$, T_{apli} es la torsión máxima realmente aplicada y T_{fij} es la torsión máxima solidificada.
- 25

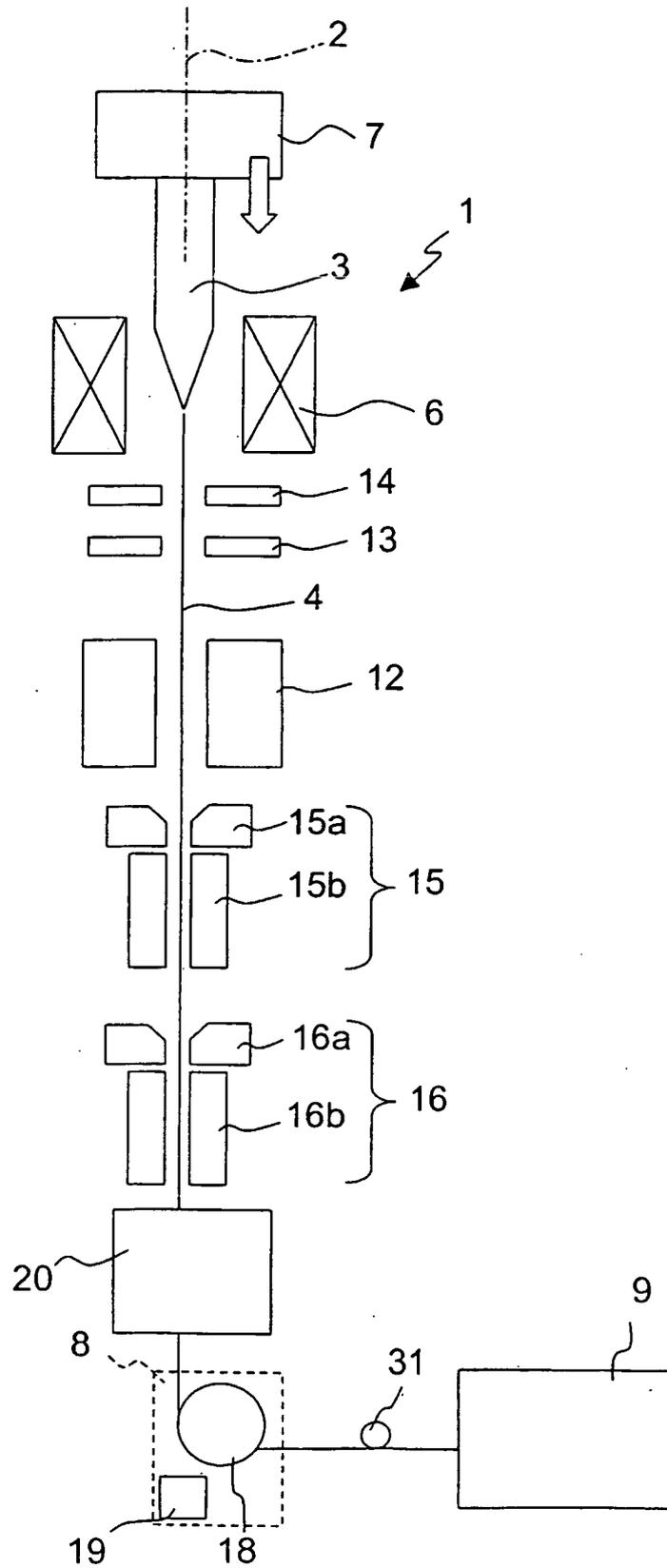


Fig. 1

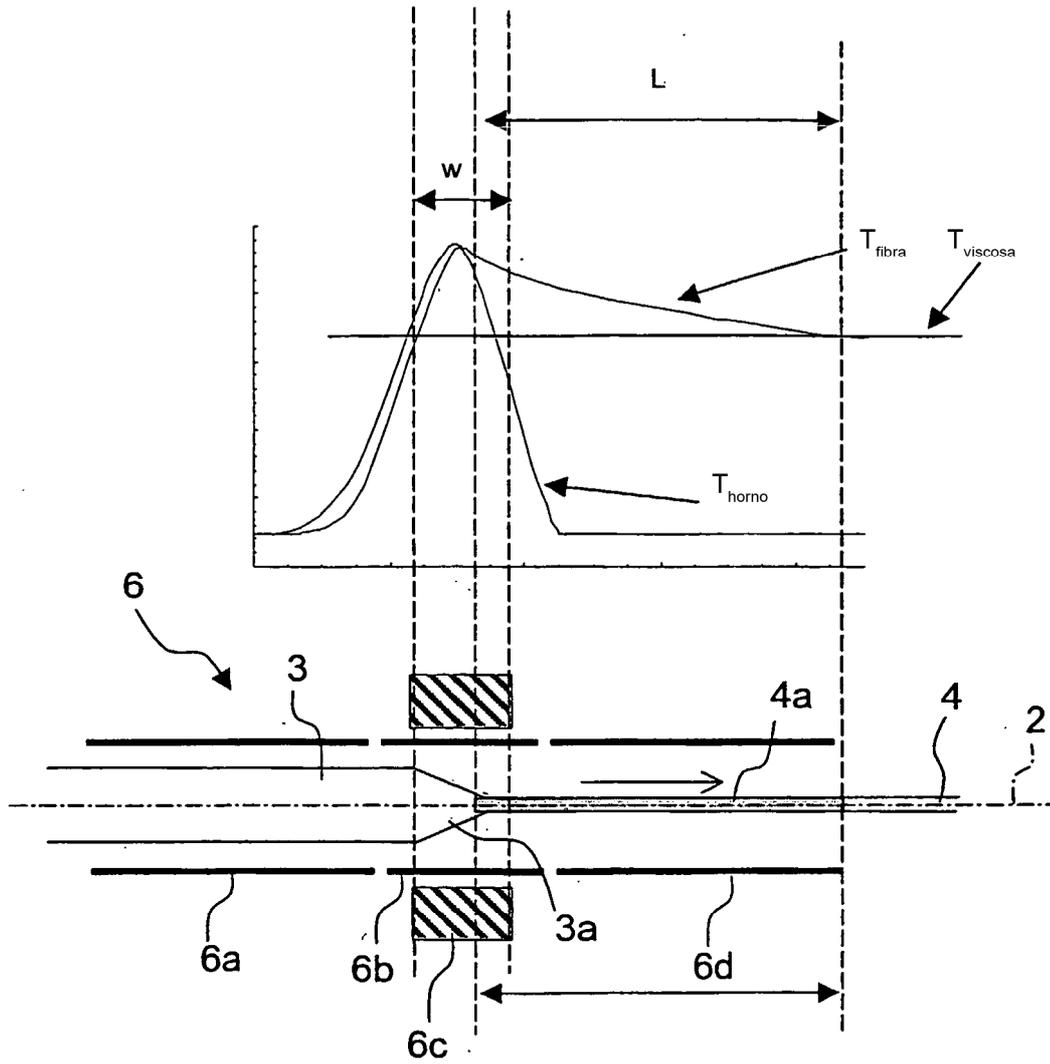


Fig. 2

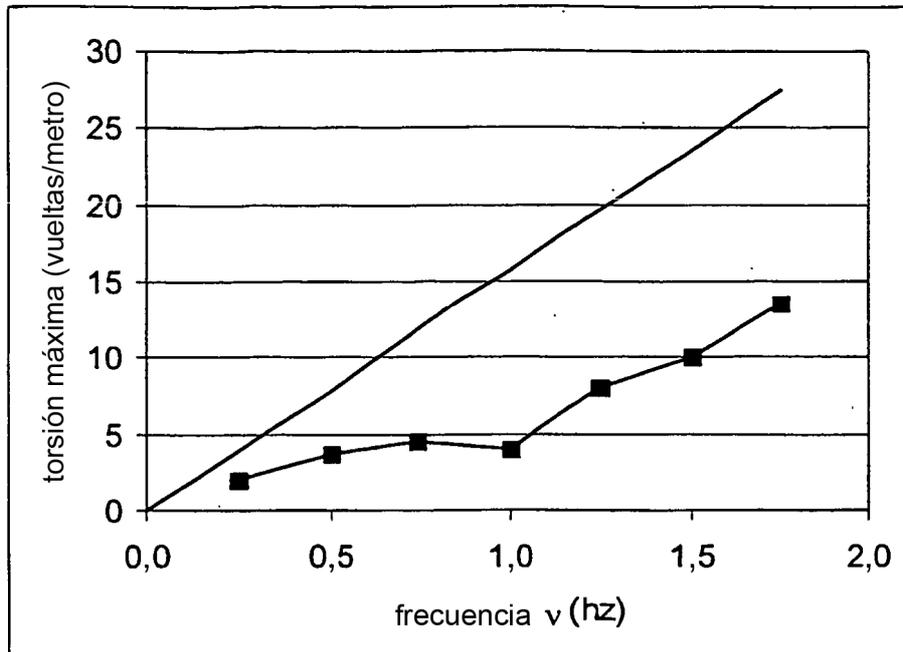


Fig. 3

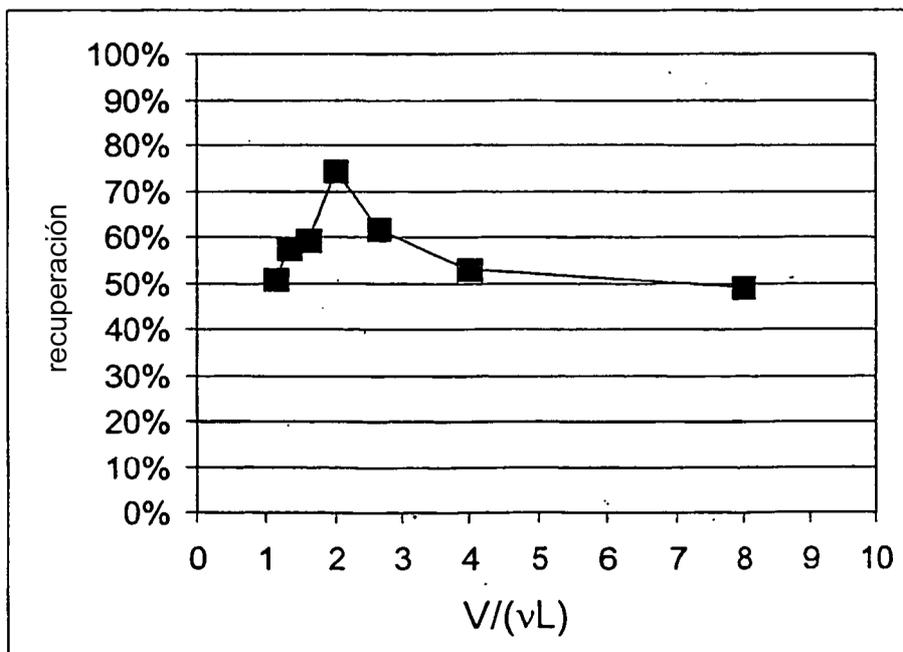


Fig. 4

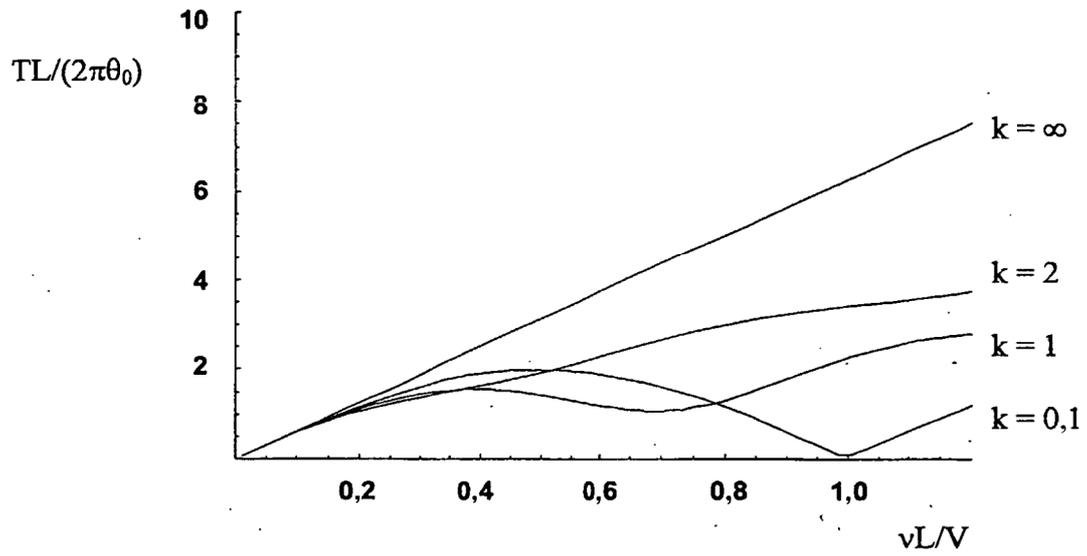


Fig. 5

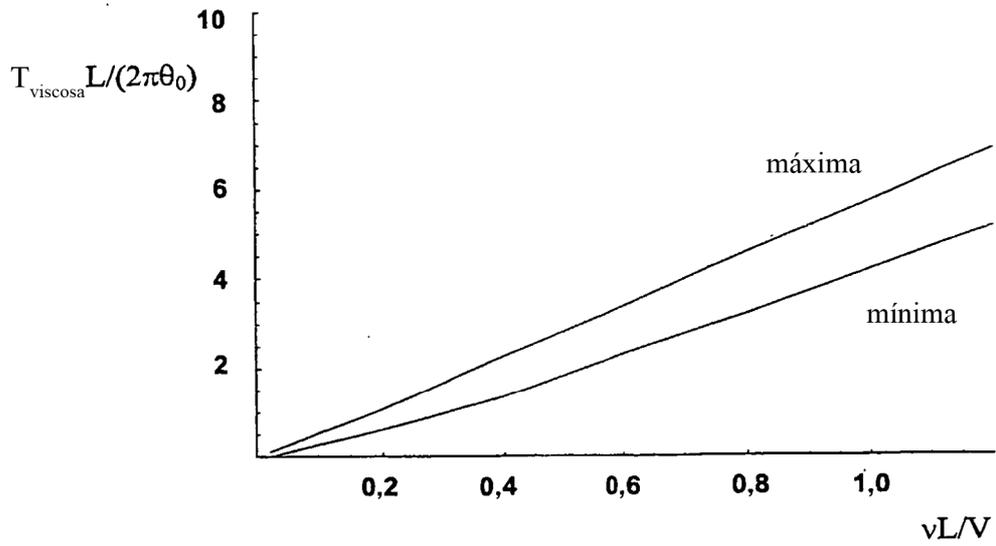


Fig. 6