



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 600 05 486 T3** 2007.07.12

(12) **Übersetzung der geänderten europäischen Patentschrift**

(97) **EP 1 153 325 B2**

(21) Deutsches Aktenzeichen: **600 05 486.1**

(86) PCT-Aktenzeichen: **PCT/GB00/00600**

(96) Europäisches Aktenzeichen: **00 903 901.7**

(87) PCT-Veröffentlichungs-Nr.: **WO 2000/049436**

(86) PCT-Anmeldetag: **18.02.2000**

(87) Veröffentlichungstag
der PCT-Anmeldung: **24.08.2000**

(97) Erstveröffentlichung durch das EPA: **14.11.2001**

(97) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung beim EPA: **24.09.2003**

(97) Veröffentlichungstag
des geänderten Patents beim EPA: **07.03.2007**

(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: **12.07.2007**

(51) Int Cl.⁸: **G02B 6/024** (2006.01)

G02B 6/036 (2006.01)

C03B 37/075 (2006.01)

C03B 37/027 (2006.01)

(30) Unionspriorität:

9903918 **19.02.1999** **GB**

9903923 **19.02.1999** **GB**

(73) Patentinhaber:

Crystal Fibre A/S, Birkerød, DK

(74) Vertreter:

**Luderschmidt, Schüler & Partner, 65189
Wiesbaden**

(84) Benannte Vertragsstaaten:

**AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT,
LI, LU, MC, NL, PT, SE**

(72) Erfinder:

**RUSSELL, St. John, Philip, Bath BA2 7EB, GB;
BIRKS, Adam, Timothy, Bath BA2 5QY, GB;
KNIGHT, Cave, Jonathan, Wellow, Bath BA2 8PY,
GB**

(54) Bezeichnung: **DOPPELBRICHENDE PHOTONISCHE KRISTALLFASERN UND METHODEN ZU IHRER HERSTELLUNG**

Die Übersetzung ist gemäß Artikel II § 3 Abs. 1 IntPatÜG 1991 vom Patentinhaber eingereicht worden. Sie wurde vom Deutschen Patent- und Markenamt inhaltlich nicht geprüft.

Beschreibung

[0001] Diese Erfindung betrifft photonische Kristallfasern sowie ein Verfahren zur Herstellung von photonischen Kristallfasern.

[0002] Eine photonische Kristallfaser stellt eine spezielle Form einer optischen Faser dar. Optische Fasern kommen auf vielen Gebieten zum Einsatz, wie z.B. der Telekommunikation, bei der Laserbearbeitung und dem Laserschweißen, bei der Übertragung von Laserstrahlen und der Laser-Stromversorgung, für Faserlaser, in Sensoren und in der medizinischen Diagnostik und in der Chirurgie. Sie werden typischerweise ganz aus festen, durchsichtigen Materialien wie z.B. Glas hergestellt und jede Faser weist typischerweise über ihre Länge die gleiche Querschnittsstruktur auf. Das durchsichtige Material in einem Teil (gewöhnlich dem Mittelteil) des Querschnitts verfügt über eine höhere Brechzahl als der Rest und bildet einen optischen Kern, in welchem mittels vollständiger Innenreflexion Licht weitergeleitet wird. Eine derartige Faser wird hier als Standardfaser bezeichnet.

[0003] Bei vielen Anwendungen werden wegen ihrer besseren Wellenleitereigenschaften optische Single-Mode-Fasern bevorzugt. Selbst so genannte optische Single-Mode-Fasern bieten jedoch im Allgemeinen keine adäquate Kontrolle über die Polarisation von sich fortpflanzendem Licht. Eine Single-Mode-Faser wird so genannt, weil sie bei einer bestimmten Frequenz nur einen transversalen Spatial-Mode weiterleitet, aber dieser Spatial-Mode kommt in zwei Polarisationszuständen vor; d.h. zwei degenerierte Moden, welche in senkrecht zueinander verlaufende Richtungen polarisiert sind. In echten Fasern wird die Degeneration solcher Moden von fehlerhaften Stellen beseitigt und es tritt eine Doppelbrechung der Moden auf, d.h. die Ausbreitungskonstante β der Moden unterscheidet sich bei jeder der senkrecht aufeinander stehenden Moden geringfügig. Weil die Doppelbrechung der Moden von zufällig verteilten Fehlstellen herrührt, variieren die Ausbreitungskonstanten entlang der Faser nach dem Zufallsprinzip. Im Allgemeinen pflanzt sich in die Faser eingeführtes Licht in beiden Moden fort und wird von kleinen Krümmungen und Verwindungen in der Faser von dem einen an den anderen gekoppelt. Linear polarisiertes Licht wird bei seiner Fortpflanzung entlang der Faser in einen willkürlichen Polarisationszustand aufgespalten.

[0004] Um die Polarisation eines Mode in einer Standardfaser beizubehalten, kann absichtlich eine Doppelbrechung in die Faser eingeführt werden (so dass sich die effektiven Indizes der beiden Polarisationsmoden voneinander unterscheiden), um dafür zu sorgen, dass die Auswirkungen von kleinen Fehlstellen belanglos sind. Ist das Licht in eine Richtung parallel zu einer der optischen Achsen der Faser linear

polarisiert, dann behält das Licht seine Polarisation bei. Ist es in einem anderen Winkel linear polarisiert, ändert sich, wenn sich das Licht in der Faser fortpflanzt, die Polarisation von linear zu elliptisch zu linear (nicht parallel zur ursprünglichen Polarisation) zu elliptisch und wieder zurück zu linear, mit einer Periode, die als Beat-length L_B bezeichnet wird, wobei

$$L_B = \frac{2\pi}{|\beta_x - \beta_y|}$$

ist und β_x und β_y die Ausbreitungskonstanten der senkrecht aufeinander stehenden Moden sind. Diese Variation ist die Folge eines Phasenunterschieds zwischen zwei senkrecht aufeinander stehenden Komponenten des Mode, welcher von dem Unterschied in ihren Ausbreitungskonstanten herrührt. Je kürzer die Beat-length ist, desto stabiler ist die Faser gegenüber polarisationsaufspaltenden Wirkungen. Typischerweise hat eine herkömmliche polarisationserhaltende Faser eine Beat-length in der Größenordnung von einem Millimeter. Das Ausmaß der Doppelbrechung lässt sich auch durch den Parameter

$$B = \frac{|\beta_x - \beta_y|}{k_0} = |n_x - n_y|$$

wiedergeben, wobei

$$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$$

(λ ist die Wellenlänge und n_x und n_y die von den senkrecht aufeinander stehenden Moden beobachteten Brechungsindizes sind).

[0005] In den letzten Jahren ist eine nicht standardmäßige Art von optischer Faser, die sog. photonische Kristallfaser (PCF), vorgestellt worden. Diese wird typischerweise aus einem einzigen, festen und im Wesentlichen transparenten Material hergestellt, in welches eine periodische Reihe von Luftlöchern eingebettet ist, welche parallel zur Faserachse verlaufen und sich über die ganze Länge der Faser erstrecken. Ein Fehler in Form eines einzelnen fehlenden Luftlochs innerhalb der regelmäßigen Anordnung bildet einen Bereich mit höherer Brechzahl, in welchem Licht auf analoge Weise wie bei der Lichtleitung in Folge vollständiger Innenreflexion bei Standardfasern weitergeleitet wird. Ein anderer Mechanismus zur Lichtleitung beruht eher auf den Wirkungen von photonischen Bandgaps als auf vollständiger Innenreflexion. Eine Leitung mit photonischen Bandgaps kann durch eine geeignete Anordnung der Reihe von Luftlöchern erzielt werden. Licht mit besonderen Ausbreitungskonstanten lässt sich auf den Kernbereich konzentrieren und breitet sich darin aus.

[0006] Eine photonische Kristallfaser lässt sich herstellen, indem Glasröhrchen, von denen einige Kapil-

laren im makroskopischen Maßstab sind, zu der benötigten Form aufeinander geschichtet und dann beim Zusammenschmelzen an Ort und Stelle gehalten und zu einer Faser ausgezogen werden. PCF weist ungewöhnliche Eigenschaften auf, wie z.B. Licht in einem Single-Mode in einem sehr breiten Bereich von Wellenlängen weiter zu leiten und Licht mit einem relativ breiten Bereich weiter zu leiten, welcher Single-Mode bleibt.

[0007] Eine Doppelbrechung lässt sich mittels verschiedener Mechanismen bewerkstelligen. Sie kann durch die anisotrope Natur der Polarisierbarkeit eines Materials hervorgerufen werden; d.h. durch Anisotropie auf atomarer Ebene. Sie kann durch die Anordnung von Elementen aus einer stofflichen Struktur mit einem größeren als dem atomaren Maßstab hervorgerufen werden; dieses Phänomen ist als Form-Doppelbrechung bekannt. Sie kann auch durch mechanische Belastung hervorgerufen werden; dieses Phänomen ist als Spannungs-Doppelbrechung oder photoelastischer Effekt bekannt. In Standardfasern wird eine Form-Doppelbrechung dadurch erreicht, dass die Form des Faserquerschnitts verändert wird, indem z.B. der Kern oder das Cladding elliptisch gemacht werden. Die Doppelbrechung in einer schlecht leitenden Faser ist im Allgemeinen ziemlich schwach ($B \sim 10^{-6}$). Eine Spannungs-Doppelbrechung lässt sich induzieren, indem Stäbe aus Borosilikatglas an den gegenüberliegenden Seiten des Faserkerns in die Preform der Faser eingesetzt werden. Eine Variation des Ortes und der Form des Stabs aus Borosilikat kann unterschiedlich große Doppelbrechungen induzieren. Mit spannungsinduzierter Doppelbrechung lässt sich ein $B \sim 10^{-4}$ erzielen.

[0008] Im Allgemeinen sind die Verfahren, die zur Erzeugung einer Doppelbrechung in Standardfasern und somit zur Erzeugung von polarisationsbewahrenden Standardfasern eingesetzt werden, nicht direkt für eine Verwendung bei photonischen Kristallfasern geeignet.

[0009] In dem US-Patent 5,802,236 werden nicht periodische mikrostrukturierte optische Fasern beschrieben, welche Strahlung mittels Index-Führung weiter leiten. In einem Beispiel weist eine Faser einen festen Kern aus Siliciumdioxid auf, der von einem inneren Claddingabschnitt und einem äußeren Claddingabschnitt umgeben ist. Die Claddingbereiche verfügen über Kapillarporen, die in axialer Richtung der Faser verlaufen, wobei die Poren im äußeren Claddingabschnitt einen größeren Durchmesser aufweisen als die Poren im inneren Claddingabschnitt, so dass die effektive Brechzahl des äußeren Claddingabschnitts größer ist als die des inneren Claddingabschnitts.

[0010] In dem US-Patent 4,551,162 wird ein Verfahren zur Bildung einer optischen Faser aus einem ein-

zigen charakteristischen Glas beschrieben. Eine Anzahl länglicher Ausgangsrohre werden thermisch erhitzt, um zu bewirken, dass sie entlang ihrer Kontaktstellen zusammenschmelzen. Das zusammengesmolzene Aggregat aus den Ausgangsrohren werden in ein hohles Hüllrohr gegeben. Die Rohre werden sodann unter Druck gesetzt und erhitzt, um Stege zu bilden, die den Kern relativ zur Umhüllung tragen. Die erhaltene Struktur einer optischen Faser wird sodann erhitzt und in einer oder mehreren Ziehstufen ausgezogen, um die fertige optische Faser zu bilden. Die mit einem solchen Verfahren hergestellte Faser weist einen Kern, eine Außenhülle und Stege auf, welche den Kern relativ zur Umhüllung tragen und Öffnungen abgrenzen, die Luft enthalten und als Cladding fungieren.

[0011] Eine der Erfindung zugrunde liegende Aufgabe besteht darin, eine photonische Kristallfaser zur Verfügung zu stellen, welche doppelbrechend ist, so dass die Faser als polarisationsbewahrende Faser verwendet werden kann. Eine weitere Aufgabe der Erfindung besteht darin, ein Verfahren zur Herstellung einer solchen Faser zur Verfügung zu stellen.

[0012] Erfindungsgemäß wird eine wie in den Ansprüchen definierte photonische Faser zur Verfügung gestellt. Die Faser weist eine zweifache und höchstens zweifache Rotationssymmetrie um eine Längsachse (und zwar jede Längsachse) der Faser auf und die Faser ist als Ergebnis dieser Symmetrie doppelbrechend.

[0013] Mit Ausnahme des Kerns kann die Anordnung der Löcher im Wesentlichen periodisch sein.

[0014] Vorteilhafterweise ist die Doppelbrechung so, dass sich in der Faser fortpflanzendes Licht mit einer Wellenlänge von $1,5 \mu$ eine Schwebungslänge von weniger als 1 cm aufweist. Noch vorteilhafter ist die Doppelbrechung so, dass sich in der Faser fortpflanzendes Licht mit einer Wellenlänge von $1,5 \mu$ eine Schwebungslänge von weniger als 5 mm aufweist. Noch vorteilhafter ist die Doppelbrechung so, dass sich in der Faser fortpflanzendes Licht mit einer Wellenlänge von $1,5 \mu$ eine Schwebungslänge von weniger als 1 mm und vorzugsweise weniger als 0,5 mm aufweist; solche kurzen Schwebungslängen lassen sich im Allgemeinen mit Standardfasern nicht erreichen. Natürlich braucht eine besondere Faser kein Licht mit einer Wellenlänge von $1,5 \mu$ weiter zu leiten; in diesem Falle lässt sich die Schwebungslänge bei einer geleiteten Wellenlänge leicht zu einer äquivalenten Schwebungslänge bei $1,5 \mu$ herauf- oder herabsetzen. Beispielsweise ist eine Schwebungslänge von 1 mm bei einer Wellenlänge von $1,55 \mu$ zu einer Schwebungslänge von 0,41 mm bei einer Wellenlänge von 633 nm äquivalent und eine Schwebungslänge von 0,5 mm bei einer Wellenlänge von $1,55 \mu$ ist zu einer Schwebungslänge von 0,21 mm bei einer

Wellenlänge von 633 nm äquivalent.

[0015] Selbstverständlich treten in einer wirklichen Faser unvermeidlich geringfügige Anomalien in der Struktur auf, was bedeutet, dass keine Faser über eine absolute Symmetrie irgendwelcher Art verfügt; bei herkömmlichen photonischen Kristallfasern ist jedoch leicht zu erkennen, dass die wirkliche Faser über ein beträchtliches Ausmaß an Rotationssymmetrie (meistens eine sechsfache Rotationssymmetrie) verfügt und dass die Symmetrie genügend ausgeprägt ist, um das Verhalten der Faser an das Verhalten einer theoretischen Faser mit absoluter Symmetrie anzugleichen. Wo auf eine Faser mit höchstens zweifacher Rotationssymmetrie Bezug genommen wird, sollte dies ähnlich so verstanden werden, dass die Faser nicht nur keinerlei höhere Symmetrie aufweist, sondern dass sie auch kein solches Verhalten aufweist, wie eine Faser mit einem signifikanten Maß an höherer Symmetrie.

[0016] Das Fehlen von Symmetrie ist auf einige Merkmale der inneren Mikrostruktur der Faser und allgemein auf die Anordnung der Löcher zurückzuführen, während die Gesamtquerschnittsform der Faser kreisförmig sein kann und somit über eine Kreissymmetrie verfügt.

[0017] Vorzugsweise befindet sich die Kreissymmetrie um eine Achse, welche durch den Kern verläuft.

[0018] Falls eine Faser über eine höhere als eine zweifache Rotationssymmetrie verfügte würde linear polarisiertes Licht die gleiche Ausbreitungskonstante β haben, wenn es parallel zu zwei oder mehr (nicht notwendigerweise senkrecht aufeinander stehenden) Achsen polarisiert ist. Wie im Falle einer wirklichen Faser mit Kreissymmetrie führen Fehlstellen in der Faser zu einem Leistungstransfer zwischen Moden, die parallel zu jeder dieser Achsen polarisiert sind. In Folge davon regt Licht, das ursprünglich linear polarisiert ist, zusätzliche Moden an und wird schnell regellos polarisiert.

[0019] Der Kern kann ein Loch aufweisen. Das Loch kann mit einem anderen Stoff als Luft gefüllt sein. Alternativ kann der Kern kein Loch aufweisen.

[0020] Die Anordnung der Löcher kann eine zweifache und höchstens zweifache Rotationssymmetrie parallel zur Längsachse der Faser aufweisen. Alternativ kann die Anordnung der Löcher eine höhere als eine zweifache Rotationssymmetrie um eine Achse parallel zur Längsachse der Faser aufweisen. Die Rotationssymmetrie kann um eine Achse bestehen, die durch den Kern verläuft.

[0021] Die zweifache Rotationssymmetrie kann zumindest teilweise von einer über den Querschnitt der Faser auftretenden Veränderung von einem der fol-

genden Parameter herrühren: der Mikrostruktur des Kerns, dem Durchmesser der Löcher, dem Grundmaterial, dem in den Löchern enthaltenen Material oder der Form der Löcher. Die Formänderung kann auf die Deformation zurückzuführen sein, die von den Belastungen in der Faser beim Ausziehen herrühren. Die zweifache Rotationssymmetrie kann von einer über den Querschnitt der Faser auftretenden Veränderung von einem der folgenden Parameter in Kombination mit einem oder mehreren der folgenden Parameter oder mit einer Veränderung bei einem anderen Parameter herrühren: der Mikrostruktur des Kerns, dem Durchmesser der Löcher, dem Grundmaterial, dem in den Löchern enthaltenen Material oder der Form der Löcher.

[0022] Die doppelbrechende Faser weist eine Form-Doppelbrechung und/oder eine Spannungs-Doppelbrechung auf. Obwohl die Form-Doppelbrechung in Standardfasern nicht ausreicht, um die erforderliche kurze Schwebungslänge zu ergeben, kann der potentiell viel größere Brechzahlkontrast in photonischen Kristallfasern zu einer starken Form-Doppelbrechung führen. Ein neuer Effekt, der mit Standardfasern nicht möglich ist, wird gefunden, wenn das Muster der Spannungen in der Faser während des Ziehprozesses bestimmte Luftlöcher deformiert, welche den Faserkern entlang einer Achse umgeben und so zu einer zusätzlichen Doppelbrechung führen.

[0023] Erfindungsgemäß wird auch ein Verfahren zur Herstellung einer doppelbrechenden photonischen Kristallfaser der Erfindung zur Verfügung gestellt, wobei das Verfahren die folgenden Schritte umfasst:

- (a) Bilden eines Bündels von Röhrchen, von denen mindestens einige Kapillaren sind, wobei das Bündel Röhrchen enthält, die so angeordnet sind, dass sie in der Faser einen Kernabschnitt bilden, sowie Röhrchen, die so angeordnet sind, dass sie in der Faser einen Hüllabschnitt bilden; und
- (b) Ziehen des Röhrchenbündels zu einer Faser,

dadurch gekennzeichnet, dass der Schritte der Bildung des Bündels von Röhrchen oder der Schritt des Ziehens so vorgenommen wird, dass die Faser eine zweifache und höchstens eine zweifache Rotationssymmetrie um eine Längsachse der Faser aufweist, wobei die Symmetrie der Faser so ist, dass die Faser doppelbrechend wird und wobei die in der Faser vorkommenden Löcher in ihrem Durchmesser über den Querschnitt der Faser variieren und/oder wobei das in den in der Faser vorkommenden Löchern enthaltene Material über den Querschnitt der Faser variiert, so dass die zweifache Symmetrie zumindest teilweise von dieser Variation herrührt.

[0024] Eine Doppelbrechung wird somit durch Modifikation des für die Herstellung der Preform der pho-

tonischen Kristallfaser verwendeten Verfahrens eingeführt. Die Modifikation des Herstellungsverfahrens kann aus der Reduzierung in der materiellen Symmetrie auf zweifache und höchstens zweifache symmetrische Parameter in dem periodischen Bündel von Röhrchen bestehen, welche die Preform umfassen. Solche Strukturen verändern im Allgemeinen sowohl die Form des geleiteten Mode als auch das Muster der Spannungen innerhalb der photonischen Kristallstruktur.

[0025] Eine Möglichkeit, mit der sich Doppelbrechung einführen lässt besteht darin, in die Preform verschiedene Kapillaren an zweifach symmetrischen Paaren von Gitterstellen einzuschließen. Solche Einschlüsse könnten in der Nähe des Kerns stattfinden, um die Form des geleiteten Mode zu ändern ("Form-Doppelbrechung") oder die könnten etwas entfernt vom Kern aber aus einem Material mit unterschiedlichen Eigenschaften erfolgen und somit das Muster der Spannungen innerhalb des Faserkerns verändern ("Spannungs-Doppelbrechung"). Die Preform kann so strukturiert sein, dass durch die Bildung von wesentlichen Teilen der Faserpreform aus unterschiedlichen Kapillartypen eine Doppelbrechung eingeführt wird, womit erneut sowohl eine Spannungs- als auch eine Form-Doppelbrechung eingeführt werden. Das grundlegende periodische Gitter, welches das Cladding des Wellenleiters bildet, könnte eine einfache dicht gepackte Ansammlung von Kapillaren mit nominell identischen Außendurchmessern sein oder es könnte eine Ansammlung von Kapillaren mit im Allgemeinen unterschiedlichen morphologischen Eigenschaften sein, welche unterschiedliche periodische Strukturen bilden. Ein quadratisches Gitter könnte aus Kapillaren und Stäbchen mit unterschiedlichen Durchmessern gebildet werden. Quadratische und rechtwinklige Gitter können verwendet werden, um für das Cladding natürlich doppelbrechende Kristallstrukturen aufzubauen, was das Design der polarisationsbewahrenden photonischen Kristallfaser vereinfacht.

[0026] Das Fehlen einer höheren Rotationssymmetrie kann zumindest teilweise von den über den Querschnitt des Bündels stattfindenden Veränderungen bei den Innendurchmessern der Kapillaren, bei dem Material aus dem die Röhrchen gefertigt sind, bei dem Material, mit dem die gefüllt sind und/oder bei den Außendurchmessern der Röhrchen herrühren.

[0027] Röhrchen können an den Scheitelpunkten eines Hüllrasters vorgesehen sein, welches eine höchstens zweifache Rotationssymmetrie über das Zentrum der zur Bildung des Kerns angeordneten Röhrchen aufweist. Kapillaren mit ausgewählten Innendurchmessern können an den Scheitelpunkten eines Hüllrasters vorgesehen sein, welches eine höchstens zweifache Rotationssymmetrie über das Zentrum der zur Bildung des Kerns angeordneten

Röhrchen aufweist, wobei sich die ausgewählten Innendurchmesser der Kapillaren an den Scheitelpunkten des Hüllrasters von den Innendurchmessern der Kapillaren an anderen Stellen unterscheiden.

[0028] Eine wesentliche Zahl von Cladding-Röhrchen in der Nähe der zur Bildung des Kerns angeordneten Röhrchen können sich voneinander unterscheiden.

[0029] Eine Doppelbrechung kann zumindest teilweise von Spannungen herrühren, die sich beim Ziehen innerhalb der Faser bildeten. Die Spannung kann an Stellen mit höchstens zweifacher Rotationssymmetrie durch den Einbau eines Röhrchens eingeführt werden, welches aus einem Material gefertigt wurde, das sich von dem unterscheidet, aus welchem mindestens einige der anderen Röhrchen in dem Raster hergestellt worden sind. Die Spannung kann an Stellen mit höchstens zweifacher Rotationssymmetrie durch den Einbau von Kapillaren eingeführt werden, welche eine Kapillarwandstärke aufweisen, die sich von der unterscheidet, welche mindestens einige der anderen Kapillaren aufweisen.

[0030] Die Spannungen können zu der Deformation der Löcher führen, welche den Kern der ausgezogenen Faser umgeben und diese Deformation kann zu einer Doppelbrechung führen.

[0031] Die Spannungen können zu Spannungen im Kern der ausgezogenen Faser führen und diese Spannungen können zu einer Doppelbrechung führen.

[0032] Die Rotationssymmetrie kann zumindest teilweise von einer Beaufschlagung mit Druck und/oder mit einem Vakuum von mindestens einer der Kapillaren während des Ausziehens des Bündels herrühren.

[0033] Das Verfahren zur Herstellung einer photonischen Kristallfaser kann ferner die Schritte umfassen:

- (a) zur Verfügung Stellen einer Anzahl von Langröhrchen mit jeweils einer Längsachse, einem ersten Ende und einem zweiten Ende, wobei mindestens einige der Röhrchen Kapillaren sind mit jeweils einem parallel zur Längsachse des Röhrchens und vom ersten Ende des Röhrchens bis zum zweiten Ende des Röhrchens verlaufenden Loch;
- (b) Formen der Röhrchen zu einem Bündel, wobei die Röhrchen mit ihren Längsachsen im Wesentlichen parallel zueinander und zur Längsachse des Bündels angeordnet werden;
- (c) Ausziehen des Bündels zu einer Faser, wobei das Loch von mindestens einer Kapillare unter einem ersten Druck in Verbindung mit einer Fluidquelle gehalten wird, während der Druck um die Kapillare unter einem zweiten Druck gehalten

wird, welcher sich vom ersten Druck unterscheidet, wobei beim Ziehprozess das Loch unter dem ersten Druck eine Größe erhält, die sich von derjenigen unterscheidet, die es ohne den Druckunterschied bekommen hätte.

[0034] In dem neuen Verfahren können während des Ausziehens deutliche und kontrollierte Veränderungen in der Faserstruktur auftreten; beispielsweise kann auch eine kontrollierte Expansion der Luftlöcher beim Ziehvorgang vorkommen. Bei photonischen Kristallfasern des Standes der Technik wurde die benötigte Mikrostruktur in makroskopischem Maßstab erzeugt und dann durch das Ausziehen zu einer Faser im Maßstab verkleinert.

[0035] Vorzugsweise wird das Röhrchenbündel über zumindest einen Teil seiner Länge von dem Rohr umgeben und das Innere des Rohr wird unter dem zweiten Druck gehalten.

[0036] Selbstverständlich betrifft der Ausdruck "Expansion der Luftlöcher" die Herstellung von Luftlöchern in einer Größe (im senkrecht zur Längsachse der Kapillaren genommenen Querschnitt), die größer ist als die, welche ohne die Druckdifferenz eingenommen worden wäre. In der Wirklichkeit weist eine mit dem Ziehprozess hergestellte Faser eine sehr viel kleineren Gesamtquerschnittsfläche auf als die Preform (hier das Röhrchenbündel), aus der sie hergestellt wurde und die Luftlöcher der Erfindung "expandieren" daher im absoluten Sinne im Allgemeinen nicht.

[0037] Veränderungen während des Ziehvorgangs lassen sich somit auf zwei hauptsächliche Weisen kontrollieren: indem an bestimmte Löcher eine Druckdifferenz angelegt wird und indem die gesamte Preform vorzugsweise in einem Rohr eingeschlossen wird, das vorzugsweise dickwandig ist und Siliciumdioxid enthalten kann und zusammen mit der Preform ausgezogen wird und einen Teil der fertigen Faser bildet. Vorzugsweise unterliegt das Rohr keiner Deformation, die sich signifikant von der unterscheidet, welche es ohne die Druckdifferenz erleiden würde.

[0038] Vorzugsweise beschränkt das Rohr die Expansion von mindestens einem der Löcher unter dem ersten Innendruck.

[0039] Vorzugsweise weist das Röhrchenbündel eine zweifache und höchstens eine zweifache Rotationssymmetrie um jede der Längsachsen auf. Ein solches Bündel kann beim Ausziehen einer doppelbrechenden Faser verwendet werden.

[0040] Vorzugsweise wird während des Ziehprozesses das Rohr nahe dem ersten Ende an einem ersten Ende einer evakuierbaren Struktur befestigt wird und

das zweite Ende des Rohres liegt in der evakuierbaren Struktur; mindestens einige der Kapillaren treten durch die evakuierbare Struktur hindurch und werden an einem zweiten Ende davon befestigt; die evakuierbare Struktur wird im Wesentlichen evakuiert, um den zweiten Innendruck zu erzeugen.

[0041] Vorzugsweise ist die evakuierbare Struktur ein Metallrohr.

[0042] Nur als Beispiel wird nun unter Bezugnahme auf die beigefügten Zeichnungen eine Ausführungsform der Erfindung beschrieben.

[0043] [Fig. 1](#) ist ein schematisches Diagramm eines Beispiels für eine Standardfaser.

[0044] [Fig. 2](#) ist ein schematisches Diagramm einer herkömmlichen photonischen Kristallfaser mit einem High-Index-Kerndefekt.

[0045] [Fig. 3](#) ist ein schematisches Diagramm einer herkömmlichen photonischen Kristallfaser (eine photonische Bandgap-Faser) mit einem Low-Index-Kerndefekt.

[0046] [Fig. 4](#) ist ein schematisches Diagramm einer photonischen Kristallfaser-Preform, welche teilweise zu einer Faser ausgezogen worden ist.

[0047] [Fig. 5](#) ist ein schematisches Querschnittsdiagramm einer polarisationsbewahrenden photonischen Kristallfaser gemäß einem Vergleichsbeispiel, in welcher die Cladding-Löcher ein rechtwinkliges Raster bilden.

[0048] [Fig. 6](#) ist ein schematisches Querschnittsdiagramm einer polarisationsbewahrenden photonischen Kristallfaser gemäß der Erfindung, in welcher das Muster der Cladding-Löcher in der Nähe des Kerns eine Zweifach-Symmetrie aufweist.

[0049] [Fig. 7](#) ist ein schematisches Querschnittsdiagramm einer polarisationsbewahrenden photonischen Kristallfaser gemäß der Erfindung, in welcher das Muster der Cladding-Löcher entfernt vom Kern eine Zweifach-Symmetrie aufweist.

[0050] [Fig. 8](#) ist ein schematisches Querschnittsdiagramm einer polarisationsbewahrenden photonischen Kristallfaser gemäß der Erfindung, in welcher das Muster der dielektrischen Einschlüsse in den Kernen des Rasters eine Zweifach-Symmetrie aufweist.

[0051] [Fig. 9](#) ist ein schematisches Querschnittsdiagramm einer Anordnung von Röhrchen zur Bildung einer photonischen Kristallfaser mit quadratischem Raster.

[0052] [Fig. 10](#) ist ein schematisches Querschnittsdiagramm eines Abschnitts einer photonischen Kristallfaser mit quadratischem Lochraster, wobei jedes Loch einen von zwei unterschiedlichen Durchmessern hat.

[0053] [Fig. 11](#) zeigt eine photonische Kristallfaser mit einem quadratischen Raster.

[0054] [Fig. 12](#) zeigt den Teil eines Bündels bildende Röhrchen zur Bildung einer photonischen Kristallfaser.

[0055] [Fig. 13](#) zeigt eine aus einem Bündel wie in [Fig. 12](#) gebildete photonische Kristallfaser.

[0056] [Fig. 14](#) zeigt schematisch ein Bündel von Kapillaren, das zur Verwendung in einem weiteren erfindungsgemäßen Verfahren geeignet ist.

[0057] [Fig. 15](#) zeigt schematisch die mit dem Bündel der [Fig. 14](#) eingesetzte Vorrichtung.

[0058] [Fig. 16a](#) zeigt die abgeschnittene Endfläche einer aus einer ähnlichen Preform wie in [Fig. 14](#) hergestellten photonischen Kristallfaser mit der Vorrichtung der [Fig. 15](#).

[0059] [Fig. 16b](#) zeigt Einzelheiten der Struktur in der Nähe des Kerns der Faser der [Fig. 16a](#).

[0060] [Fig. 17a](#) zeigt eine mit der Vorrichtung der [Fig. 15](#) hergestellte hoch doppelbrechende Faser.

[0061] [Fig. 17b](#) zeigt die bei einer Wellenlänge von 1550 nm in der Faser der [Fig. 17a](#) beobachtete Polarisations-Schwebung.

[0062] In ihrer einfachsten Form umfassen Standardfasern, wie die in [Fig. 1](#) gezeigte, einen zylindrischen Kern **10** und ein konzentrisches zylindrisches Cladding. Typischerweise werden sowohl der Kern als auch das Cladding aus dem gleichen Material, üblicherweise Siliciumdioxid, hergestellt, aber jedes wird mit einem anderen Material dotiert, um die Brechzahl des Kerns **10** zu erhöhen und die Brechzahl des Cladding **20** zu senken. Licht geeigneter Wellenlänge wird im Kern **10** eingeschlossen und darin mittels vollständiger Innenreflexion an der Grenze **15** von Kern und Cladding weiter geleitet.

[0063] Eine typische, in [Fig. 2](#) gezeigte photonische Kristallfaser umfasst einen Zylinder aus transparentem Grundmaterial **30** (z.B. Siliciumdioxid) mit einem Raster zylindrischer Löcher **40**, welches entlang ihrer Länge verläuft. Die Löcher sind an den Scheitelpunkten und Mittelpunkten von regelmäßigen Sechsecken angeordnet, welche eine sechsfache Rotationssymmetrie aufweisen. Die Löcher weisen regelmäßige Abstände auf, die nur durch das Fehlen eines Loches

in der Nähe des Fasermittelpunkts unterbrochen sind. Der Bereich **50** der die Stelle des fehlenden Loches umgebenden Faser hat die Brechzahl des Grundmaterials **30**. Die Brechzahl der restlichen Faser hängt sowohl von der Brechzahl des Grundmaterials **30** als auch von der Brechzahl der Luft in den Köchern **40** ab. Die Brechzahl der Luft ist niedriger als z.B. die von Siliciumdioxid und als Folge davon liegt die "effektive Brechzahl" des Materials mit den Löchern unter der des das fehlende Loch umgebenden Bereichs **50**. Die Faser kann daher Licht ungefähr auf den Bereich **50** auf analoge Weise konzentrieren, wie bei der Wellenleitung mittels vollständiger Innenreflexion in Standardfasern. Der Bereich **50** wird deshalb als "Kern" der photonischen Kristallfaser bezeichnet.

[0064] In einer anderen Form einer photonischen Kristallfaser dient die Leitung eines photonischen Bandgaps zur Konzentrierung von Licht auf den "Kern" der Faser. In dem in [Fig. 3](#) gezeigten Beispiel für eine solche Faser gibt es im Grundmaterial **30** eine Matrix von Löchern **70**. Die Löcher sind an den Scheitelpunkten (aber nicht in den Mittelpunkten der [Fig. 2](#)) von regelmäßigen Sechsecken angeordnet, welche eine sechsfache Rotationssymmetrie aufweisen. Die Regelmäßigkeit der Matrix wird wieder durch eine Fehlstelle unterbrochen, welche aber in dem wiedergegebenen Beispiel ein zusätzliches Loch **60** im Mittelpunkt eines der Sechsecke des Rasters darstellt, wobei das Sechseck sich in der Nähe des Mittelpunkts der Faser befindet. Der das zusätzliche Loch **60** umgebende Bereich kann wieder als Kern der Faser bezeichnet werden. Lässt man (für den Augenblick) das Loch **60** außer Betracht, führt die Periodizität der Löcher in der Faser dazu, dass in den Ausbreitungskonstanten des Lichts ein Bandgap auftritt, welcher sich in der Faser fortpflanzen kann. Das zusätzliche Loch **60** sorgt effektiv für einen Bereich mit unterschiedlicher Periodizität und dieser Bereich kann Ausbreitungskonstanten tragen, die sich von den in der übrigen Faser getragenen unterscheiden. Falls einige der in dem Bereich des Lochs **60** getragenen Ausbreitungskonstanten in den Bandgap der in der übrigen Faser verbotenen Ausbreitungskonstanten fällt, dann wird Licht mit solchen Ausbreitungskonstanten in den Kern konzentriert und pflanzt sich darin fort. Es ist darauf hinzuweisen, dass in dem ausgewiesenen Beispiel für die Leitung von Wellen keine vollständigen Innenreflexionseffekte verantwortlich sind, da das Loch **60** eine Low-Index-Fehlstelle darstellt (es führt dazu, dass Luft ist, wo sich sonst Grundmaterial befinden würde).

[0065] Photonische Kristallfasern lassen sich nach einem Verfahren herstellen, von dem eine Stufe in [Fig. 4](#) wiedergegeben ist. In den ersten (nicht gezeigten) Stufen des Verfahrens wird ein Zylinder aus dem Grundmaterial (z.B. Siliciumdioxid) so gerändert, dass er einen sechseckigen Querschnitt aufweist und

längs seiner Zylinderachse wird ein Loch gebohrt. Der Stab wird sodann unter Einsatz eines Faserziehsturms zu einem Röhrchen ausgezogen. Das Röhrchen wird in diskrete Längen zerschnitten und die erhaltenen kurzen Röhrchen **80** werden zusammengepackt, um ein Bündel von Röhrchen zu bilden, wie dies in [Fig. 4](#) gezeigt wird. Das Röhrchen **100** in der Mitte des dargestellten Bündels ist keine Kapillare, d.h. es weist kein Loch auf. Das dargestellte Bündel bildet eine Faser des Typs mit einer Effective-Index-Guidance. Das Bündel der Röhrchen **80** wird zusammengeschnitten und dann zur fertigen photonischen Kristallfaser **110** ausgezogen.

[0066] Die in [Fig. 5](#) gezeigte Faser weist ein Raster **120** von Löchern auf, die an den Scheitelpunkten von Rechtecken angeordnet sind, welche keine Quadrate darstellen. Die Periodizität des Rasters wird durch das Fehlen eines Loches im Bereich **125** in der Nähe des Mittelpunkts des Faserquerschnitts unterbrochen. Der Abstand von Mittelpunkt zu Mittelpunkt (Pitch) der Löcher unterscheidet sich parallel zur x-Achse (Pitch Δx) von dem Pitch (Δy) parallel zur y-Achse. Die in [Fig. 5](#) gezeigte Faser könnte hergestellt werden, indem ein Röhrchen verwendet wird, welches gerändert wird, um einen rechteckigen Querschnitt zu erhalten. Das Raster der [Fig. 5](#) weist eine zweifache Rotationssymmetrie auf und ist daher doppelbrechend.

[0067] Die [Fig. 6](#) und [Fig. 7](#) zeigen photonische Kristallfasern, welche Fasern mit einer Effective-Index-Guidance darstellen und ein sechseckiges Raster aufweisen, ähnlich dem der Faser in [Fig. 2](#). Solche Raster sind nicht von sich aus doppelbrechend. In den Rastern der [Fig. 6](#) und [Fig. 7](#) haben jedoch die Löcher **140** einen größeren Durchmesser als die Löcher **130**. Diese Anisotropie im Raster führt zu einem zweifach rotationssymmetrischen Muster von Löchern um den Bereich **135**, wo im Raster ein Loch fehlt. Das Muster der großen Löcher **140** in [Fig. 6](#) hat eine Wirkung, die der einer Form-Doppelbrechung in einer Standardfaser analog ist. Die Variation im Lochdurchmesser nahe dem "Kern" **135** führt direkt zu einer von einem geleiteten Mode gesehenen Variation der effektiven Brechzahl.

[0068] Das Muster der großen Löcher **140** in [Fig. 7](#) verursacht Spannungen im Kern, welche auf die gleiche Art und Weise zu einer Doppelbrechung führt, wie in Standardfasern eine Doppelbrechung verursacht wird. Eine neue, bei Standardfasern nicht mögliche Wirkung besteht darin, dass während des Ziehvorgangs von dem Muster der Spannungen im Faserrohrchen einige der den Faserkern **135** längs einer Achse umgebenden Luftlöcher deformiert werden, was eine zusätzliche Doppelbrechung ergibt.

[0069] Eine weitere, in [Fig. 8](#) wiedergegebene alternative Ausführungsform besteht darin, dass einige

der Löcher **150** mit einem anderen Material als Luft gefüllt werden (so dass sie eine unterschiedliche Dielektrizitätskonstante aufweisen). Erneut wird die sechsfache Rotationssymmetrie des Rasters zu einer zweifachen Rotationssymmetrie reduziert.

[0070] Das in [Fig. 9](#) gezeigte Bündel von Röhrchen besteht aus drei Typen:

Röhrchen **160** mit großem Durchmesser, welche Kapillaren darstellen, kompakte Röhrchen **170** mit kleinem Durchmesser und ein kompaktes **180** mit großem Durchmesser. Die Röhrchen sind so angeordnet, dass die Röhrchen **160** mit großem Durchmesser ein quadratisches Raster bilden, welches von einer Fehlstelle an einem in der Mitte gelegenen Ort unterbrochen wird, wobei die Fehlstelle das kompakte Röhrchen **180** mit großem Durchmesser ist. Die Zwischenraumgaps, welche von der nicht schachbrettartigen Struktur der Röhrchen **160** mit kreisrundem Querschnitt herrühren, sind mit den Röhrchen **170** mit kleinem Querschnitt ausgefüllt.

[0071] In [Fig. 10](#) wird eine photonische Kristallfaser mit zweifacher Symmetrie gezeigt. Die Faser weist eine Rasterstruktur auf, die aus einem Röhrchenbündel gefertigt werden kann, welches auf ähnliche Weise angeordnet ist wie das Bündel der [Fig. 9](#). Das kompakte Röhrchen **180** führt zu einer Fehlstelle ähnlich der Fehlstelle **210**. In diesem Fall jedoch weisen abwechselnde Reihen von Löchern (**190**, **200**) jeweils große und kleine Durchmesser auf. Ein solcher Effekt könnte erzielt werden, indem das Raster der [Fig. 9](#) mit abwechselnden Reihen von Röhrchen **160** mit großen und kleinen Innendurchmessern (aber mit konstanten Außendurchmessern) versehen wird.

[0072] Wie ersichtlich, weist die Faser der [Fig. 11](#) ein annähernd quadratisches Raster auf, wie es aus dem Bündel der [Fig. 9](#) hätte hergestellt werden können.

[0073] In [Fig. 12](#) wird ein Bündel von Röhrchen **220** gezeigt, welche Kapillaren sind. Die Röhrchen sind in einem sechseckigen Raster angeordnet, mit einer Periodizität in der Struktur, welche von einem kompakten Röhrchen **240** unterbrochen wird. Es ist zu bemerken, dass eine Reihe von Röhrchen in der Fotografie etwa auf halbem Wege nach oben Kapillaren mit dickeren Wänden **250** aufweisen als die die Wände **230** der anderen Kapillaren. Wird aus einem Röhrchenbündel eine Faser ausgezogen, führt eine derartige Anordnung zu einer wie in [Fig. 13](#) gezeigten Faser mit einer Reihe von Löchern **260** mit einem kleineren Durchmesser als die die anderen Löcher in der Faser.

[0074] Es könnten viele andere Muster aus Kapillaren und Röhrchen, die sich ion verschiedenen Parametern voneinander unterscheiden, ins Auge gefasst werden, welche in den Schutzbereich der Erfindung

fallen würden.

[0075] Ein weiteres Verfahren zur Herstellung einer Faser ist in den [Fig. 14](#) und [Fig. 15](#) wiedergegeben. Ein Bündel aus einer regelmäßigen Anordnung von Kapillaren **300** wird in ein dickwandiges Glasrohr **310** aus Siliciumdioxid gesetzt ([Fig. 14](#)). Das Glasrohr **310** aus Siliciumdioxid bildet nach dem Ausziehen einen Teil der Faser, indem es als Mantel dient, um für mechanische Festigkeit zu sorgen. Während des Ziehvorgangs ([Fig. 15](#)) wird das Innere des Rohrs **310** evakuiert, indem es in eine evakuierbare Struktur eingeschlossen wird, während das Innere von einigen oder allen Kapillaren **300** unter einem unterschiedlichen und z.B. höheren Druck gehalten wird, da sie gegenüber der Umgebung offen gehalten werden.

[0076] Die evakuierbare Struktur ist ein Messingzylinder **320**. Am Anfang ist er an beiden Enden offen. Der Zylinder wird sodann an einem Ende gegenüber dem Rohr **310** abgedichtet. Das Rohr endet innerhalb des Messingzylinders **320**. Einige oder alle Kapillaren **300** gehen ganz durch den Messingzylinder **320** hindurch der sodann um die Kapillaren abgedichtet wird, welche oben ganz durch den Zylinder hindurchgehen. Während des Ziehvorgangs wird der Messingzylinder **320** evakuiert.

[0077] Während des Ziehvorgangs, in welchem das Rohr **310** und die Kapillaren **300** nach unten vom Messingzylinder weg gezogen werden, kollabiert das Außenrohr **310** nicht, obwohl es evakuiert wird, da es dicke Wände aufweist. Im Gegensatz dazu kollabieren die Zwischenraumlöcher zwischen den Kapillaren, die schon kleiner sind und durch die Kapillarwände definierte relativ dünne Begrenzungen aufweisen, schnell und treten in der fertigen Faser nicht in Erscheinung (was erwünscht ist). Falls um die Kapillare ein höherer Druck herrscht, kollabieren die evakuierten Kapillaren ebenfalls. Auf der anderen Seite expandieren die mit Atmosphärendruck gefüllten Kapillaren.

[0078] Wenn man sich das gerade beschriebene Verfahren zu Eigen macht, ist es möglich, sehr regelmäßige und dünnwandige Strukturen zu formen und Fasern mit sehr kleinen Leiterkernen herzustellen. In [Fig. 16](#) wird eine derartige Faser gezeigt, welche nach dem Ausziehen ein äußeres Cladding **330** aufweist, das das Rohr **310** umfasst, sowie ein inneres Cladding **340** mit den Kapillaren **300**. Das innere Cladding hat einen Radius von annähernd 10 μm und umfasst eine Bienenwabenstruktur von expandierten Löchern. Die Löcher umgeben einen Leiterkern **350**, der einen Durchmesser von annähernd 1 μm aufweist und aus einem länglichen Röhrchen gebildet wurde, das keine Kapillare ist. Es ist zu erkennen, dass die in [Fig. 16](#) gezeigte Faser hergestellt wird, indem alle Kapillaren **300** ganz durch den Zylinder **320**

hindurch treten und sie verfügt im Wesentlichen über eine vielfache Rotationssymmetrie; somit ist die Faser im Wesentlichen nicht doppelbrechend.

[0079] Im Gegensatz dazu wird in [Fig. 17](#) eine Faser gezeigt, die stark doppelbrechend gemacht wird, indem an bestimmten Stellen Kapillaren mit dickeren Wänden gebündelt werden; an solchen Stellen bilden sich kleinere Luftlöcher **360**. Ein alternatives Verfahren zur Herstellung der Faser könnte darin bestehen, dass vier ausgewählte Kapillaren innerhalb des Zylinders **320** enden; Die Löcher in solchen ausgewählten Kapillaren **300** würden während des Ausziehvorgangs nicht expandieren und würden dadurch für die vier kleinen Löcher **360** sorgen. Die Faser der [Fig. 17a](#) ist stark doppelbrechend, weil sie nur eine zweifache Symmetrie aufweist, die von den vier kleineren Löchern **360** herrührt, welche auf jeder Seite des Kerns längs eines Durchmessers des inneren Cladding liegen.

[0080] In [Fig. 17b](#) werden die Daten für Polarisations-Schwebung der Faser der [Fig. 17a](#) gezeigt. Aus den Daten kann gezeigt werden, dass die Schwebungslänge der Faser bei einer Wellenlänge von 1550 nm 0,92 mm beträgt; eine derartige Schwebungslänge ist für die Faser ausreichend kurz, damit diese als eine polarisationsbewahrende photonische Single-Mode-Kristallfaser fungieren kann.

Patentansprüche

1. Photonische Kristallfaser, welche ein Grundmaterial mit einer Anordnung von länglichen Löchern (**120**) und einen Führungskern (**135**) umfasst, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Faser eine zweifache und höchstens eine zweifache Rotationssymmetrie um eine Faserlängsachse aufweist, wobei die Symmetrie der Faser so angeordnet ist, dass die Faser doppelbrechend wird und in welcher die Löcher in ihrem Durchmesser (**130**, **140**) über den Querschnitt der Faser variieren und/oder in welcher das in den Löchern (**130**, **150**) enthaltene Material über den Querschnitt der Faser variiert, so dass die zweifache Rotationssymmetrie zumindest teilweise von dieser Variation herrührt.

2. Photonische Kristallfaser nach Anspruch 1, in welcher die Anordnung der Löcher (**120**) mit Ausnahme des Kerns (**135**) im Wesentlichen periodisch ist.

3. Photonische Kristallfaser nach Anspruch 1 oder 2, in welcher die Faser angeordnet ist, um eine solche Doppelbrechung zu ergeben, dass sich in der Faser fortpflanzendes Licht mit einer Wellenlänge von 1,5 μm eine Schwebungslänge von weniger als 5 mm aufweist.

4. Photonische Kristallfaser nach jedem der vorhergehenden Ansprüche, in welcher die Rotations-

symmetrie um eine durch den Kern (**135**) führende Achse ausgerichtet ist.

5. Photonische Kristallfaser nach jedem der Ansprüche 1 bis 4, in welcher der Kern ein Loch aufweist.

6. Photonische Kristallfaser nach Anspruch 5, in welcher das Loch mit einem anderen Material als Luft gefüllt ist.

7. Photonische Kristallfaser nach jedem der Ansprüche 1 bis 4, in welcher der Kern kein Loch aufweist.

8. Photonische Kristallfaser nach jedem der vorhergehenden Ansprüche, in welcher die Anordnung der Löcher eine zweifache und höchstens eine zweifache Rotationssymmetrie um die Längsachse der Faser aufweist.

9. Photonische Kristallfaser nach jedem der Ansprüche 1 bis 7, in welcher die Anordnung der Löcher (**120**) eine höhere als eine zweifache Rotationssymmetrie um eine parallel zur Längsachse der Faser verlaufende Achse aufweist.

10. Photonische Kristallfaser nach jedem der vorhergehenden Ansprüche, in welcher der Kern eine Mikrostruktur aufweist, die sich über den Querschnitt der Faser so ändert, dass die zweifache Rotationssymmetrie zumindest teilweise von dieser Änderung herrührt.

11. Photonische Kristallfaser nach jedem der vorhergehenden Ansprüche, in welcher sich das Grundmaterial über den Querschnitt der Faser so ändert, dass die zweifache Rotationssymmetrie zumindest teilweise von dieser Änderung herrührt.

12. Photonische Kristallfaser nach jedem der vorhergehenden Ansprüche, in welcher sich die Löcher in ihrer Form über den Querschnitt der Faser so ändern, dass die zweifache Rotationssymmetrie zumindest teilweise von dieser Änderung herrührt.

13. Photonische Kristallfaser nach Anspruch 12, in welcher die Formänderung auf einer von Spannungen in der Faser beim Ziehen herrührenden Deformation beruht.

14. Photonische Kristallfaser nach jedem der vorhergehenden Ansprüche, in welcher die Faser eine Formdoppelbrechung zeigt.

15. Photonische Kristallfaser nach jedem der vorhergehenden Ansprüche, in welcher die Faser eine Spannungsdoppelbrechung zeigt.

16. Verfahren zur Herstellung einer doppelbre-

chenden photonischen Kristallfaser nach Anspruch 1, wobei das Verfahren die folgenden Schritte umfasst:

(a) Bilden eines Bündels von Röhrchen, von denen mindestens einige Kapillaren sind, wobei das Bündel Röhrchen enthält, die so angeordnet sind, dass sie in der Faser einen Kernabschnitt bilden, sowie Röhrchen, die so angeordnet sind, dass sie in der Faser einen Hüllabschnitt bilden; und

(b) Ziehen des Röhrchenbündels zu einer Faser, dadurch gekennzeichnet, dass der Schritte der Bildung des Bündels von Röhrchen oder der Schritt des Ziehens so vorgenommen wird, dass die Faser eine zweifache und höchstens eine zweifache Rotationssymmetrie um eine Längsachse der Faser aufweist, wobei die Symmetrie der Faser so ist, dass die Faser doppelbrechend wird und wobei die in der Faser vorkommenden Löcher in ihrem Durchmesser über den Querschnitt der Faser variieren und/oder wobei das in den in der Faser vorkommenden Löchern enthaltene Material über den Querschnitt der Faser variiert, so dass die zweifache Symmetrie zumindest teilweise von dieser Variation herrührt.

17. Verfahren nach Anspruch 16, in welchem die Röhrchen in dem Bündel so angeordnet sind, dass sie eine zweifache und höchstens zweifache Rotationssymmetrie um eine Längsachse des Bündels aufweisen.

18. Verfahren nach Anspruch 16 oder 17, in welchem der Innendurchmesser der Kapillaren (**230**, **250**) sich über den Querschnitt des Bündels ändert, so dass das Fehlen einer höheren Rotationssymmetrie mindestens teilweise von dieser Änderung herrührt.

19. Verfahren nach jedem der Ansprüche 16 bis 18, in welchem die Röhrchen aus einem sich über den Querschnitt des Bündels ändernden Material gefertigt werden, so dass das Fehlen einer höheren Rotationssymmetrie mindestens teilweise von dieser Änderung herrührt.

20. Verfahren nach jedem der Ansprüche 16 bis 19, in welchem die Kapillaren mit sich über den Querschnitt des Bündels änderndem Material gefüllt werden, so dass das Fehlen einer höheren Rotationssymmetrie mindestens teilweise von dieser Änderung herrührt.

21. Verfahren nach jedem der Ansprüche 16 bis 20, in welchem sich über den Querschnitt des Bündels der Außendurchmesser der Röhrchen ändert, so dass das Fehlen einer höheren Rotationssymmetrie mindestens teilweise von dieser Änderung herrührt.

22. Verfahren nach jedem der Ansprüche 16 bis 21, in welchem Röhrchen an den Scheitelpunkten eines Hüllrasters vorgesehen werden, welches eine

höchstens zweifache Rotationssymmetrie über das Zentrum der zur Bildung des Kerns angeordneten Röhrchen aufweist.

23. Verfahren nach jedem der Ansprüche 16 bis 21, in welchem Kapillaren von ausgewähltem Innendurchmesser an den Scheitelpunkten eines Hüllrasters vorgesehen werden, welches eine höchstens zweifache Rotationssymmetrie über das Zentrum der zur Bildung des Kerns angeordneten Röhrchen aufweist, wobei sich die ausgewählten Innendurchmesser der Kapillaren an den Scheitelpunkten des Hüllrasters von den Innendurchmessern der Kapillaren an anderen Stellen unterscheiden.

24. Verfahren nach jedem der Ansprüche 16 bis 23, in welchem eine wesentliche Anzahl von Hüllröhrchen in der Nähe der zur Bildung des Kerns angeordneten Röhrchen sich von einer wesentlichen Anzahl von Hüllröhrchen entfernt von den zur Bildung des Kerns angeordneten Röhrchen unterscheiden.

25. Verfahren nach jedem der Ansprüche 16 bis 24, in welchem sich beim Ziehen Spannungen im Innern der Fasern ausbilden, so dass die Fasersymmetrie zumindest teilweise von diesen Spannungen herrührt.

26. Verfahren nach Anspruch 25, in welchem an Stellen im Bündel mit einer höchstens zweifachen Rotationssymmetrie die Spannung durch Einschluss eines Röhrchens eingeführt wird, das aus einem Material besteht, das sich von dem unterscheidet, aus welchem zumindest einige der anderen Röhrchen im Gitter gefertigt sind.

27. Verfahren nach Anspruch 24, in welchem an Stellen im Bündel mit einer höchstens zweifachen Rotationssymmetrie die Spannung durch Einschluss von Kapillaren eingeführt wird, die eine Wanddicke aufweisen, welche sich von derjenigen von zumindest einigen der anderen Kapillaren unterscheidet.

28. Verfahren nach jedem der Ansprüche 25 bis 27, in welchem die den Kern der gezogenen Faser umgebenden Löcher deformiert werden und die Spannungen von dieser Deformation herrühren.

29. Verfahren nach jedem der Ansprüche 16 bis 28, in welchem die Rotationssymmetrie zumindest teilweise von der Druckbeaufschlagung von mindestens einer der Kapillaren beim Ziehen des Bündels herrührt.

30. Verfahren nach jedem der Ansprüche 16 bis 28, in welchem die Rotationssymmetrie zumindest teilweise von der Vakuumbeaufschlagung von mindestens einer der Kapillaren beim Ziehen des Bündels herrührt.

31. Verfahren zur Herstellung einer photonischen Kristallfaser nach jedem der Ansprüche 16 bis 30 mit den weiteren Schritten:

(a) zur Verfügung Stellen einer Anzahl von Langröhrchen mit jeweils einer Längsachse, einem ersten Ende und einem zweiten Ende, wobei mindestens einige der Röhrchen Kapillaren (**300**) sind mit jeweils einem parallel zur Längsachse des Röhrchens und vom ersten Ende des Röhrchens bis zum zweiten Ende des Röhrchens verlaufenden Loch;

(b) Formen der Röhrchen zu einem Bündel, wobei die Röhrchen mit ihren Längsachsen im Wesentlichen parallel zueinander und zur Längsachse des Bündels angeordnet werden;

(c) Ausziehen des Bündels zu einer Faser, wobei das Loch von mindestens einer Kapillare unter einem ersten Druck in Verbindung mit einer Fluidquelle gehalten wird, während der Druck um die Kapillare unter einem zweiten Druck gehalten wird, welcher sich vom ersten Druck unterscheidet, wobei beim Ziehprozess das Loch unter dem ersten Druck eine Größe erhält, die sich von derjenigen unterscheidet, die es ohne den Druckunterschied bekommen hätte.

32. Verfahren nach Anspruch 31, in welchem ein Rohr (**310**) das Bündel von Röhrchen über mindestens einen Teil ihrer Länge umgibt und das Innere des Rohrs unter dem zweiten Druck gehalten wird.

33. Verfahren nach Anspruch 31, in welchem das Rohr (**310**) die Expansion von mindestens einem der Löcher bei dem ersten Innendruck begrenzt.

34. Verfahren nach jedem der Ansprüche 31 bis 33, in welchem das Rohr (**310**) keiner Deformation unterliegt, welche sich deutlich von derjenigen unterscheidet, welche sie ohne den Druckunterschied erleiden würde.

35. Verfahren nach jedem der Ansprüche 31 bis 34, in welchem beim Ziehprozess: das Rohr (**310**) nahe dem ersten Ende an einem ersten Ende einer evakuierbaren Struktur (**320**) befestigt wird und das zweite Ende des Rohres in der evakuierbaren Struktur (**320**) liegt; mindestens einige der Kapillaren (**300**) durch die evakuierbare Struktur (**320**) hindurch treten und an einem zweiten Ende davon befestigt werden; die evakuierbare Struktur (**320**) im Wesentlichen evakuiert wird, um den zweiten Innendruck zu erzeugen.

36. Verfahren nach Anspruch 35, in welchem die evakuierbare Struktur (**320**) ein Metallrohr ist.

37. Verfahren nach jedem der Ansprüche 31 bis 36, in welchem das Röhrchenbündel um jede der Längsachsen eine zweifache und höchstens zweifache Rotationssymmetrie aufweist.

Es folgen 9 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

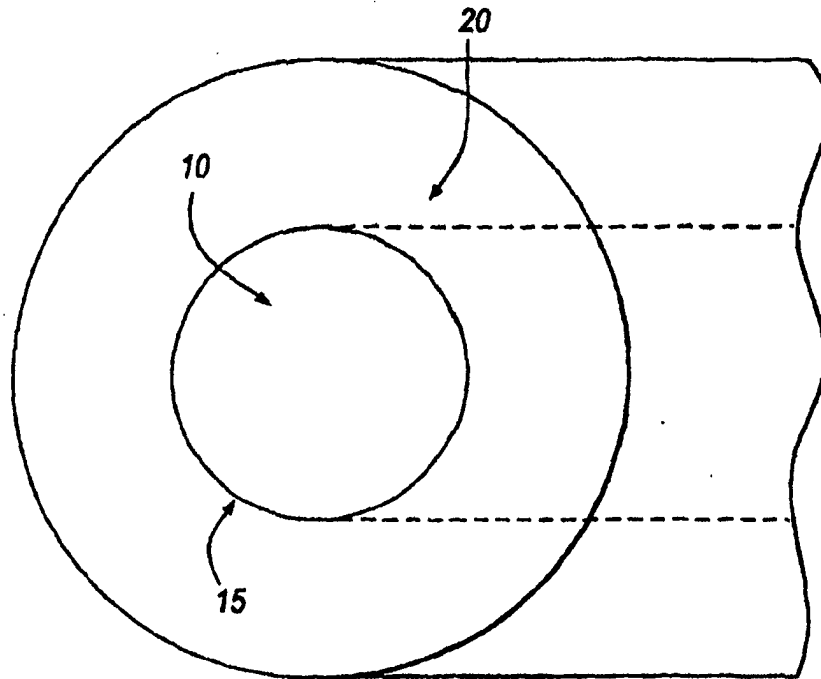


Fig. 1

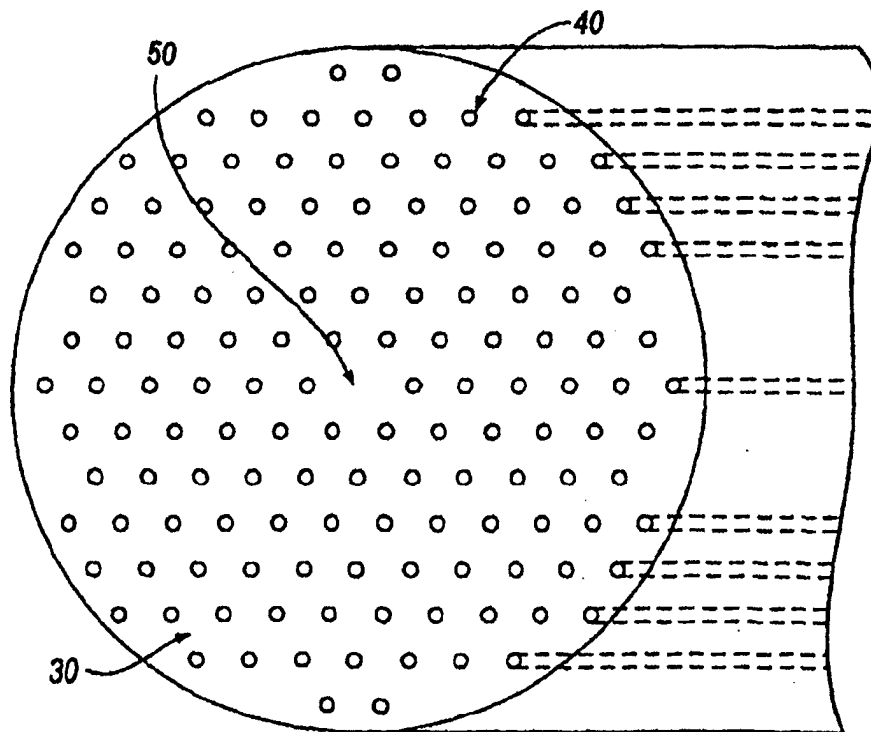


Fig. 2

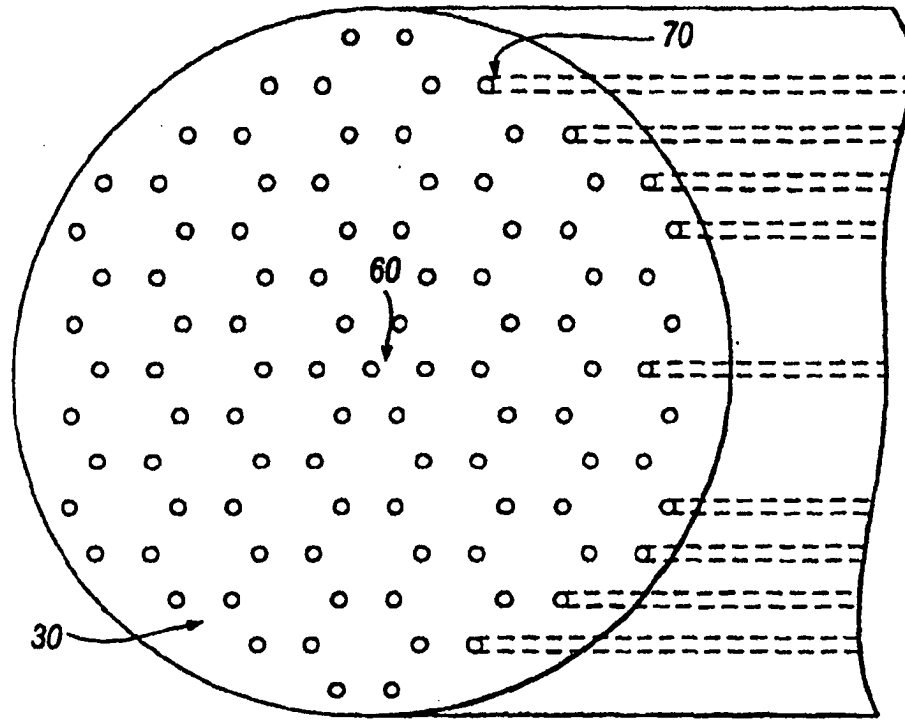


Fig. 3

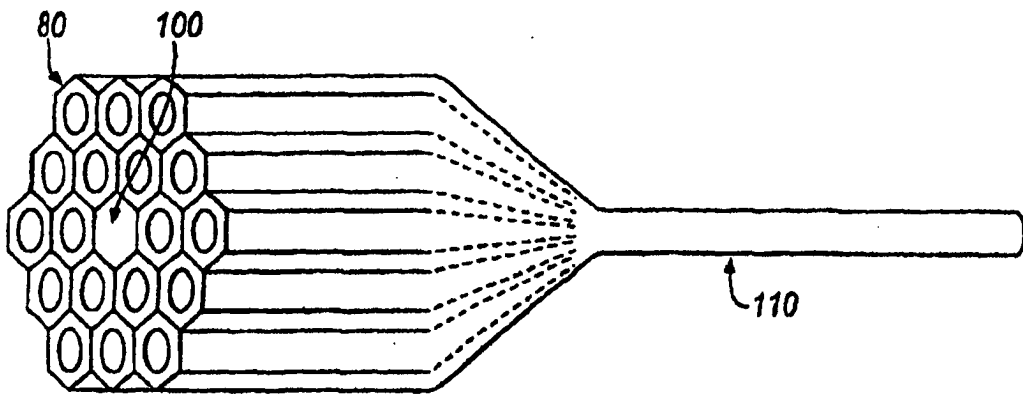


Fig. 4

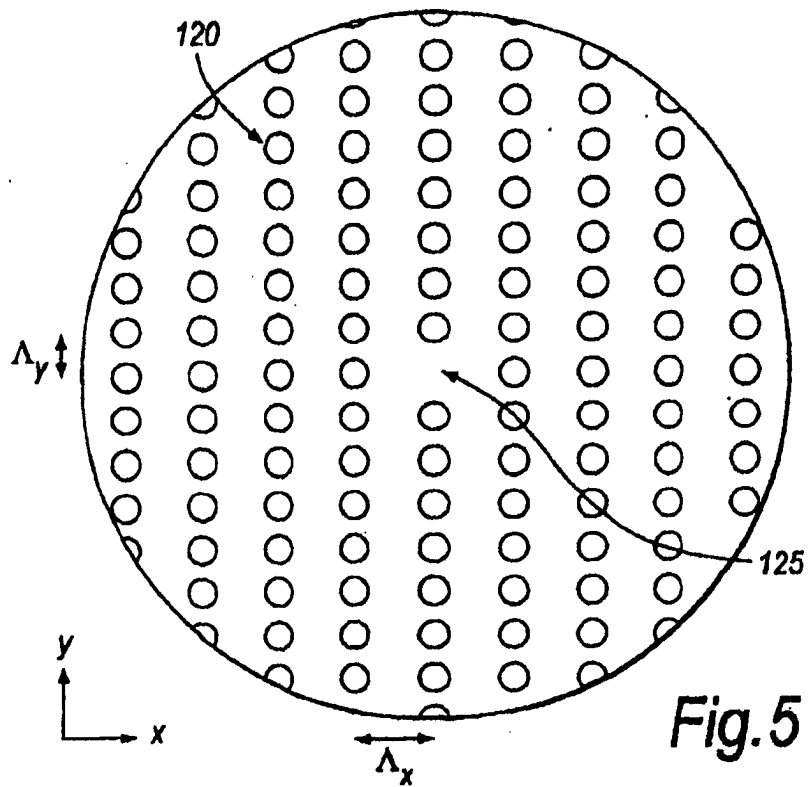


Fig. 5

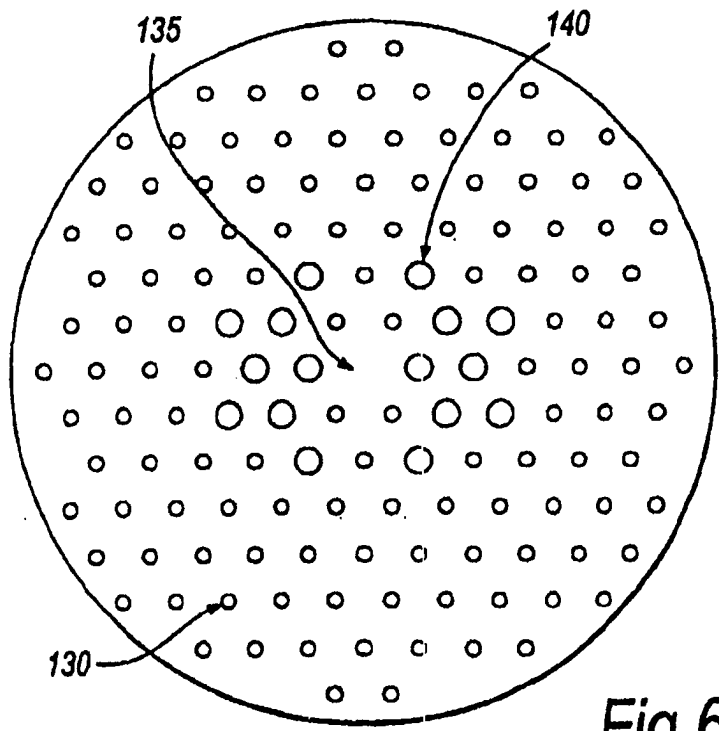
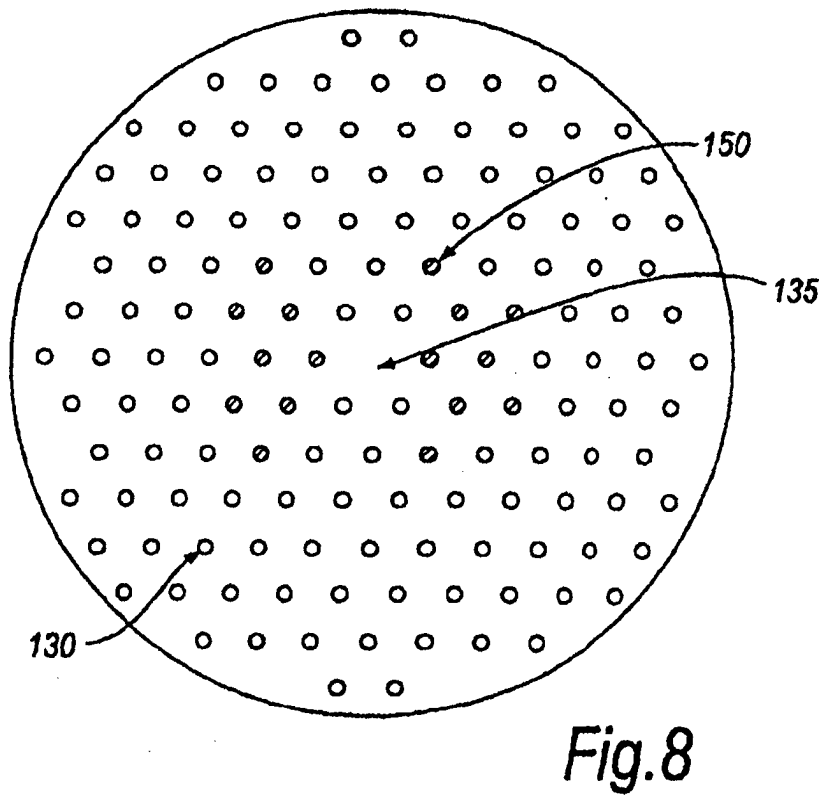
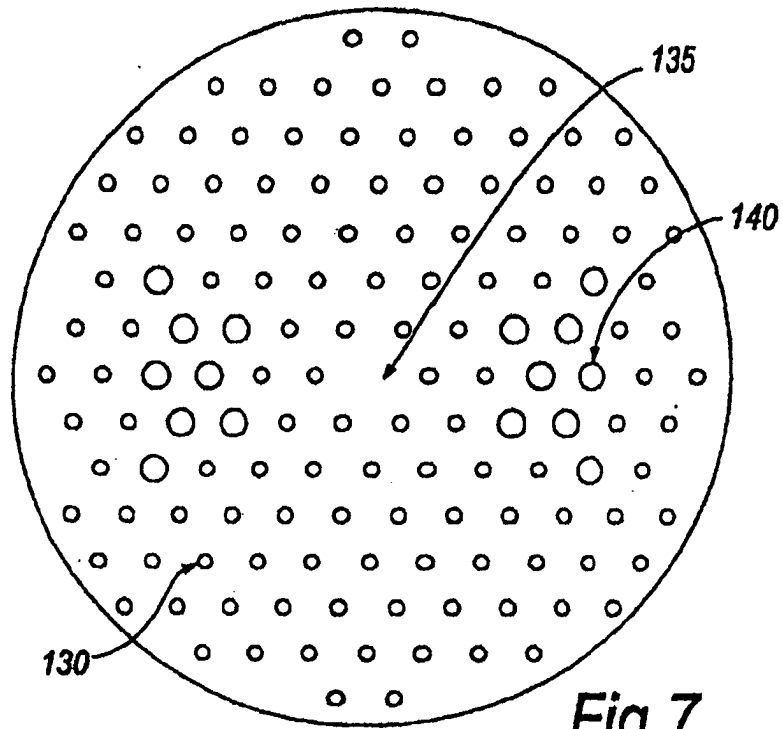


Fig. 6



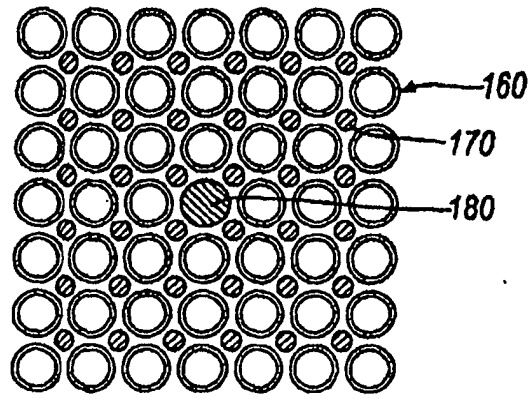


Fig. 9

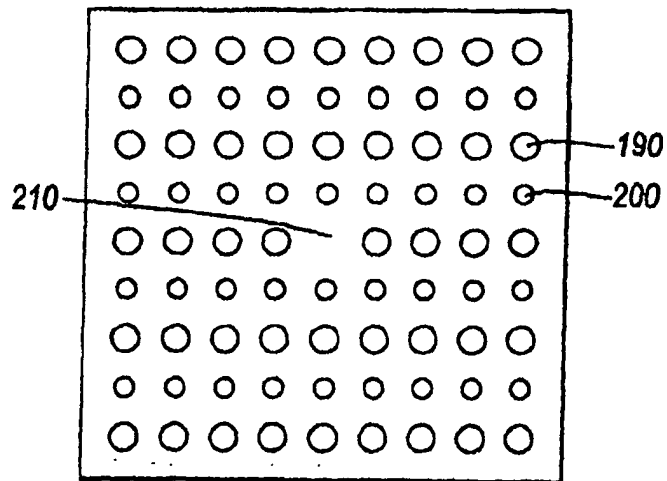


Fig. 10

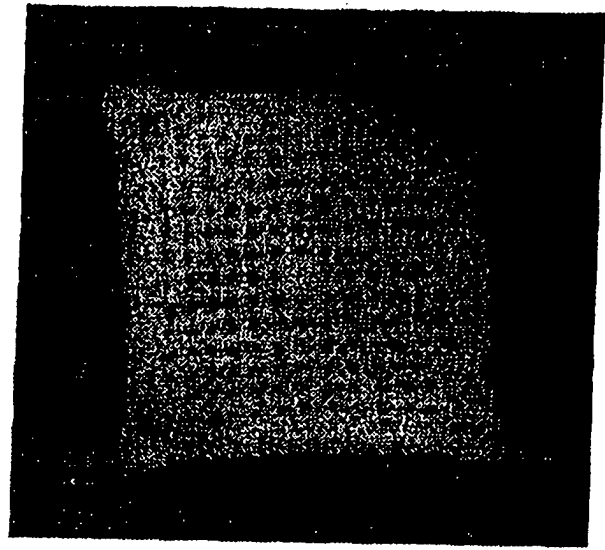


Fig. 11

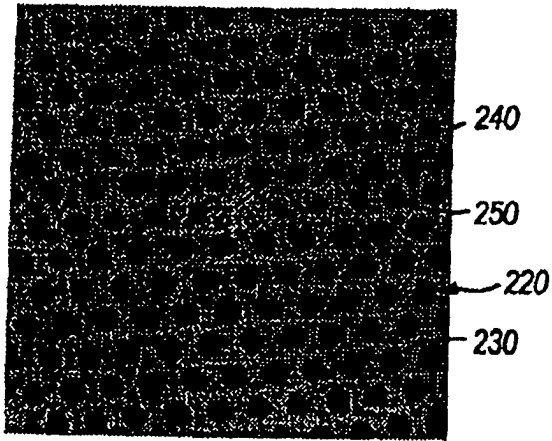


Fig. 12

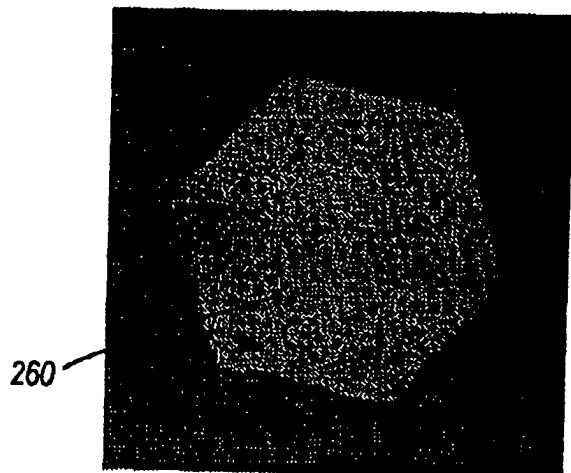
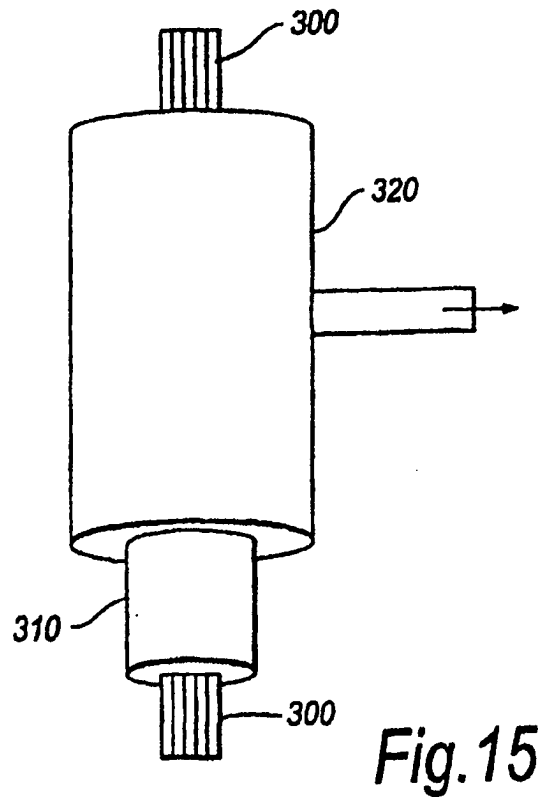
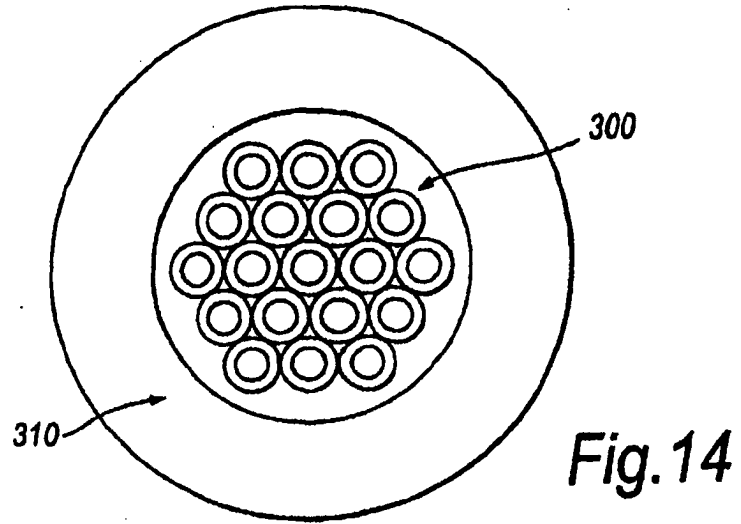


Fig. 13



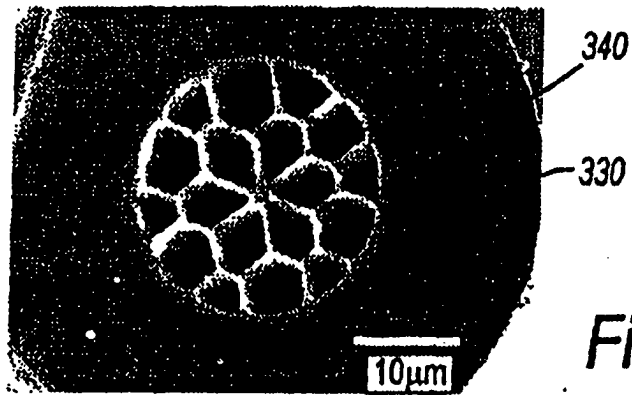


Fig. 16(a)

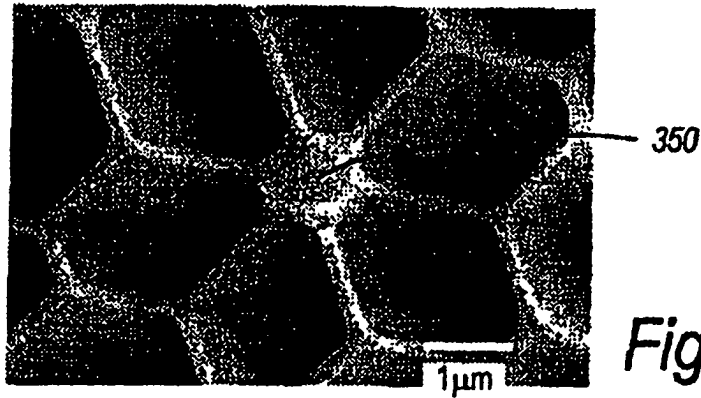


Fig. 16(b)

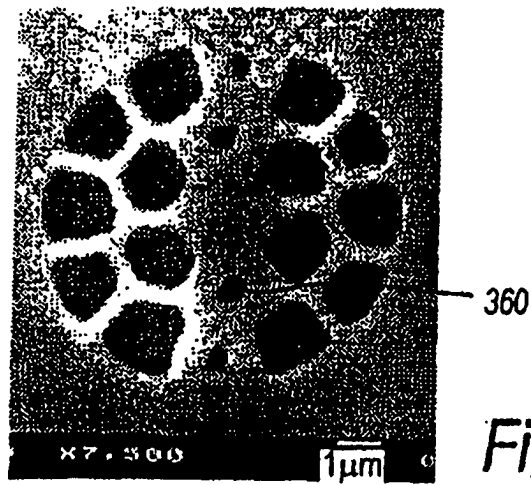


Fig. 17(a)

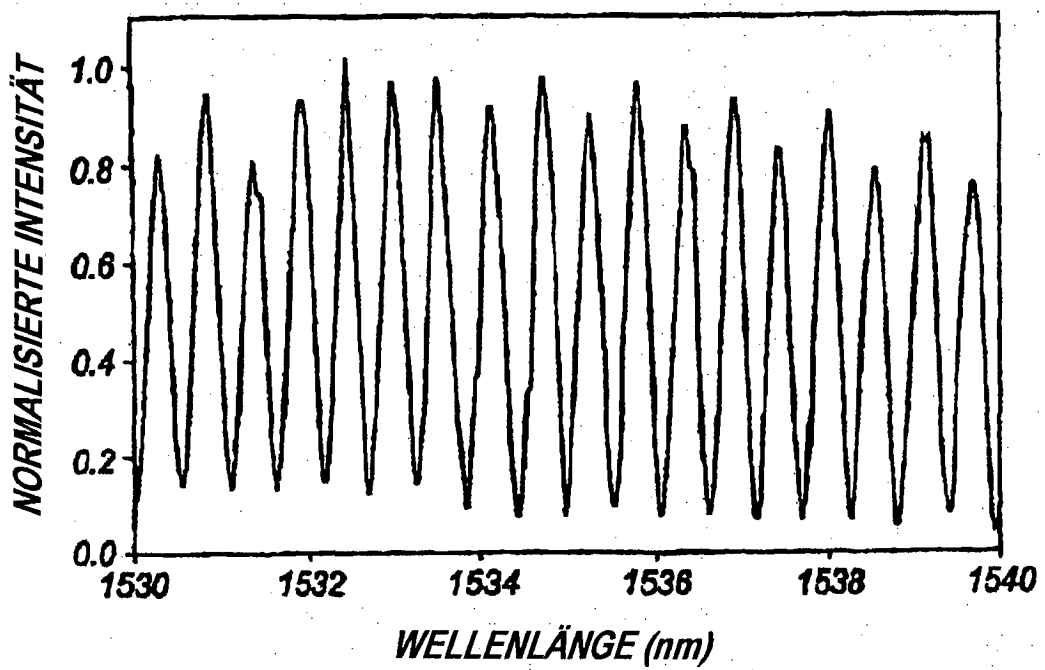


Fig.17(b)