



(19)  
Bundesrepublik Deutschland  
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 600 25 766 T2** 2006.10.12

(12)

## Übersetzung der europäischen Patentschrift

(97) **EP 1 340 725 B1**

(21) Deutsches Aktenzeichen: **600 25 766.5**

(96) Europäisches Aktenzeichen: **03 009 883.4**

(96) Europäischer Anmeldetag: **18.02.2000**

(97) Erstveröffentlichung durch das EPA: **03.09.2003**

(97) Veröffentlichungstag

der Patenterteilung beim EPA: **25.01.2006**

(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: **12.10.2006**

(51) Int Cl.<sup>8</sup>: **C03B 37/075** (2006.01)

**C03B 37/027** (2006.01)

**G02B 6/024** (2006.01)

**C03B 37/012** (2006.01)

(30) Unionspriorität:

**9903918**      **19.02.1999**      **GB**

**9903923**      **19.02.1999**      **GB**

(73) Patentinhaber:

**Crystal Fibre A/S, Birkerød, DK**

(74) Vertreter:

**Strehl, Schübel-Hopf & Partner, 80538 München**

(84) Benannte Vertragsstaaten:

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

(72) Erfinder:

**Russel, Philip St.John, Southstoke, Bath BA2  
7EB, GB; Birks, Timothy Adam, Combe Down,  
Bath BA2 5QY, GB; Knight, Jonathan Cave,  
Wellow, Bath BA2 8PY, GB**

(54) Bezeichnung: **Herstellungsverfahren einer photonischen Kristallfaser**

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist (Art. 99 (1) Europäisches Patentübereinkommen).

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]** Die vorliegende Erfindung betrifft Photonenkristallfasern und ein Verfahren zur Herstellung von Photonenkristallfasern.

**[0002]** Eine Photonenkristallfaser ist eine spezielle Form einer optischen Faser. Optische Fasern werden auf vielen Gebieten verwendet, einschließlich der Telekommunikation, der Laserbearbeitung und dem Laserschweißen, der Abgabe von Laserstrahlen und Energie, Faserlasern, Sensoren und in der medizinischen Diagnostik und der Chirurgie. Sie bestehen in der Regel zur Gänze aus transparenten Vollmaterialien wie Glas, wobei jede Faser meist über ihre Länge einen gleichbleibenden Querschnittaufbau hat. Das transparente Material hat in einem Teil (gewöhnlich in der Mitte) des Querschnitts einen höheren Brechungsindex als der Rest und bildet einen optischen Kern, in dem Licht durch innere Totalreflexion geleitet wird. Wir bezeichnen eine solche Faser als Standardfaser.

**[0003]** Optische Monomodefaseren werden wegen ihrer überlegenen Wellenleiteigenschaften bei vielen Anwendungen bevorzugt. Aber auch die sogenannten Monomodefaseren bieten im allgemeinen keine ausreichende Kontrolle über die Polarisation des sich ausbreitenden Lichts. Die Monomodefaser wird so genannt, da sie bei der interessierenden Frequenz nur eine räumliche Transversalmode unterstützt, die räumliche Mode umfaßt jedoch zwei Polarisationszustände; das heißt zwei entartete Moden, die zueinander senkrecht polarisiert sind. In realen Fasern brechen Verunreinigungen die Entartung dieser Moden auf und es tritt eine modale Doppelbrechung auf, das heißt die Moden-Ausbreitungskonstante  $\beta$  ist für die beiden orthogonalen Moden etwas unterschiedlich. Da sich die modale Doppelbrechung aus zufälligen Verunreinigungen ergibt, ändern sich die Ausbreitungskonstanten längs der Faser zufällig. Im allgemeinen breitet sich in die Faser eingeführtes Licht in beiden Moden aus und wird durch kleine Biegungen und Verdrehungen der Faser von der einen Mode in die andere übergeführt. Linear polarisiertes Licht wird daher bei der Ausbreitung längs der Faser in einen zufälligen Polarisationszustand übergeführt.

**[0004]** Um die Polarisation einer Mode in einer Standardfaser aufrechtzuerhalten, kann absichtlich eine Doppelbrechung in die Faser eingebracht werden (so daß die effektiven Indizes für die beiden Polarisationsmoden unterschiedlich sind), damit die Auswirkungen von kleinen Verunreinigungen unbedeutend bleiben. Wenn das Licht in einer Richtung parallel zu einer der optischen Achsen der Faser linear polarisiert ist, behält es seine Polarisation. Wenn es unter einem anderen Winkel linear polarisiert ist, ändert sich die Polarisation beim Fortschreiten des Lichts durch die Faser von linear zu elliptisch zu line-

ar (nicht parallel zur Ausgangspolarisation) zu elliptisch und wieder zurück zu linear mit einer Periode, die als Schwebungslänge  $L_B$  bekannt ist mit

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

wobei  $\beta_x$  und  $\beta_y$  die Ausbreitungskonstanten der orthogonalen Moden sind. Diese Variation ist eine Folge der Phasenunterschiede zwischen den beiden orthogonalen Komponenten der Mode, die sich aus dem Unterschied in den Ausbreitungskonstanten ergeben. Je kürzer die Schwebungslänge ist, um so elastischer ist die Faser auf Polarisationsmischeffekte. In der Regel hat eine herkömmliche polarisationsbewahrende Faser eine Schwebungslänge in der Größenordnung eines Millimeters. Die Stärke der Doppelbrechung kann dargestellt werden durch den Parameter

$$B = \frac{|\beta_x - \beta_y|}{k_0} = |n_x - n_y| \quad \text{mit} \quad k_0 = \frac{2\pi}{\lambda},$$

(wobei  $\lambda$  die Wellenlänge ist) und  $n_x$  und  $n_y$  die Brechungsindizes sind, die von den orthogonalen Moden gesehen werden.

**[0005]** In den letzten Jahren wurde eine optische Nicht-Standard-Faser vorgestellt, die Photonenkristallfaser (PCF) genannt wird. In der Regel besteht diese Faser aus einem einzigen festen und im wesentlichen transparenten Material, in das ein periodisches Array von Luftlöchern eingebettet ist, die parallel zur Faserachse verlaufen und sich über die ganze Länge der Faser erstrecken. Ein Defekt in der Form eines einzigen fehlenden Luftlochs in dem regelmäßigen Array bildet einen Bereich mit erhöhtem Brechungsindex, in dem das Licht auf eine Weise geführt wird, die der Führung durch die innere Totalreflexion in der Standardfaser analog ist. Ein anderer Mechanismus zum Führen des Lichts beruht statt auf der inneren Totalreflexion auf photonischen Bandlückeneffekten. Die photonische Bandlückenführung läßt sich durch eine geeignete Anordnung des Arrays der Luftlöcher erhalten. Licht mit bestimmten Ausbreitungskonstanten läßt sich auf den Kern beschränken und breitet sich darin aus.

**[0006]** Photonenkristallfasern können dadurch hergestellt werden, daß Glasstäbe, von denen einige Kapillaren im makroskopischen Maßstab sind, in der gewünschten Form aufeinandergelegt und festgehalten werden, während sie miteinander verschmolzen und zu einer Faser ausgezogen werden. Eine PCF hat ungewöhnliche Eigenschaften, etwa die, Licht im Monomode über einen sehr breiten Bereich an Wellenlängen zu leiten, und die, Licht mit einem relativ großen Modenbereich zu leiten, das im Monomode bleibt.

**[0007]** Eine Doppelbrechung kann durch verschiedene Mechanismen erzeugt werden. Sie kann durch die anisotrope Natur der Polarisierbarkeit eines Materials hervorgerufen werden; d.h. durch eine Anisotropie auf der Atomebene. Sie kann durch die Anordnung von Elementen mit einer Materialstruktur in einem größeren Maßstab wie für die Atome hervorgerufen werden; dieses Phänomen ist als Form-Doppelbrechung bekannt. Sie kann auch durch mechanische Spannungen hervorgerufen werden; dieses Phänomen ist als Spannungs-Doppelbrechung oder photoelastischer Effekt bekannt. In Standardfasern wird die Form-Doppelbrechung durch Verändern der Form des Faserquerschnitts erreicht; zum Beispiel dadurch, daß der Kern oder die Umhüllung elliptisch gemacht werden. Die Doppelbrechung ist in einer schwach führenden Faser im allgemeinen ziemlich gering ( $B \sim 10^{-6}$ ). Eine Spannungs-Doppelbrechung kann durch das Einfügen von Stäben aus Borsilikatglas auf gegenüberliegenden Seiten des Faserkerns in der Faser-Vorform erzeugt werden. Eine Veränderung der Anbringungsstelle und der Form der Borsilikatstäbe kann eine Doppelbrechung in unterschiedlichen Ausmaßen hervorrufen. Die spannungsinduzierte Doppelbrechung erlaubt ein  $B \sim 10^{-4}$ .

**[0008]** Die zum Erzeugen einer Doppelbrechung in Standardfasern und damit zum Herstellen von polarisationsbewahrenden Standardfasern verwendeten Verfahren sind im allgemeinen nicht unmittelbar für die Anwendung bei Photonenkristallfasern geeignet.

**[0009]** Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es, eine Photonenkristallfaser zu schaffen, die derart doppelbrechend ist, daß die Faser als polarisationsbewahrende Faser verwendet werden kann. Eine weitere Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist die Schaffung eines Verfahrens zum Herstellen einer solchen Faser.

**[0010]** Die Erfindung ist im Patentanspruch 1 definiert, sie ermöglicht die Schaffung einer Photonenkristallfaser aus einem Grundmaterial mit einer Anordnung von longitudinalen Löchern und einem führenden Kern, wobei die Faser um eine Längsachse (das heißt jede Längsachse) eine höchstens zweifache Rotationssymmetrie aufweist und aufgrund dieses Mangels an Symmetrie doppelbrechend ist.

**[0011]** Die Anordnung der Löcher kann mit der Ausnahme des Vorhandenseins des Kerns im wesentlichen periodisch sein.

**[0012]** Vorteilhaft ist die Doppelbrechung derart, daß Licht mit einer Wellenlänge von 1,5 Mikrometern, das sich in der Faser ausbreitet, eine Schwebungslänge von weniger als 1 cm hat. Noch besser ist die Doppelbrechung derart, daß Licht mit einer Wellenlänge von 1,5 Mikrometern, das sich in der Faser ausbreitet, eine Schwebungslänge von weniger als 5

mm hat. Noch besser ist die Doppelbrechung derart, daß Licht mit einer Wellenlänge von 1,5 Mikrometern, das sich in der Faser ausbreitet, eine Schwebungslänge von weniger als 1 mm und vorzugsweise weniger als 0,5 mm hat; solche kurzen Schwebungslängen sind mit Standardfasern im allgemeinen nicht zu erhalten. Natürlich kann eine bestimmte Faser auch nicht Licht mit einer Wellenlänge von 1,5 Mikrometern leiten; in diesem Fall kann die Schwebungslänge bei der geleiteten Wellenlänge leicht auf eine äquivalente Schwebungslänge bei 1,5 Mikrometern vergrößert oder verkleinert werden. Zum Beispiel ist eine Schwebungslänge von 1 mm bei einer Wellenlänge von 1,55 Mikrometern 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 Mikrometern ist einer Schwebungslänge von 0,21 mm bei einer Wellenlänge von 633 nm äquivalent.

**[0013]** Es ist klar, daß in einer realen Faser die Struktur unvermeidlich kleine Anomalien aufweist, was heißt, daß keine Faser eine absolute Symmetrie irgendeiner Art aufweist; es ist jedoch offensichtlich, daß bei den herkömmlichen Photonenkristallfasern die reale Faser ein beträchtliches Ausmaß an Rotationssymmetrie besitzt (üblicherweise eine sechsfache Rotationssymmetrie), und daß die Symmetrie ausreichend groß ist, damit das Verhalten der Faser dem einer theoretischen Faser ähnelt, die absolut symmetrisch ist. Auf eine ähnliche Weise hat, wenn ein Bezug zu einer Faser mit einer höchstens zweifachen Rotationssymmetrie erfolgt, die Faser nicht nur nicht exakt eine höhere Symmetrie, sondern sie verhält sich auch nicht so wie eine Faser mit einem wesentlichen Ausmaß an höherer Symmetrie.

**[0014]** Der Mangel an Symmetrie kann sich aus Merkmalen der inneren Mikrostruktur der Faser ergeben und wie üblich aus der Anordnung der Löcher, während die Querschnittsform der Faser insgesamt kreisförmig sein kann und damit kreissymmetrisch; es liegt innerhalb des Umfangs der Erfindung, daß die Anordnung der Löcher eine mehr als zweifache Rotationssymmetrie aufweist, daß die Faser jedoch in einem anderen Sinn keine mehr als zweifache Rotationssymmetrie besitzt. Beispiele für solche Anordnungen werden weiter unten angegeben.

**[0015]** Vorzugsweise weist die Faser eine zweifache Rotationssymmetrie auf.

**[0016]** Vorzugsweise liegt die Rotationssymmetrie um eine Achse vor, die durch den Kern verläuft.

**[0017]** Wenn eine Faser eine mehr als zweifache Rotationssymmetrie aufweist, besitzt polarisiertes Licht bei einer Polarisation parallel zu zwei oder mehr (nicht notwendigerweise orthogonalen) Achsen die gleiche Ausbreitungskonstante  $\beta$ . Wie bei realen Fa-

sern mit Kreissymmetrie führen Störstellen in der Faser zu einer Energieübertragung zwischen den Moden, die parallel zu jeder dieser Achsen polarisiert sind. Licht, das anfänglich linear polarisiert ist, regt daher zusätzliche Moden an und wird schnell in zufällig polarisiertes Licht verwandelt.

**[0018]** Der Kern kann ein Loch aufweisen. Das Loch kann mit einem Material gefüllt sein, das nicht Luft ist. Alternativ kann der Kern auch kein Loch aufweisen.

**[0019]** Die Anordnung der Löcher kann parallel zur Längsachse der Faser eine höchstens zweifache Rotationssymmetrie aufweisen. Alternativ kann die Anordnung der Löcher um eine Achse, die parallel zur Längsachse der Faser ist, eine mehr als zweifache Rotationssymmetrie aufweisen. Die Rotationssymmetrie kann um eine Achse vorliegen, die durch den Kern verläuft.

**[0020]** Der Mangel an höherer Rotationssymmetrie kann zumindest zum Teil das Ergebnis einer Veränderung über den Querschnitt der Faser in einem oder mehreren der folgenden Punkte sein: Der Mikrostruktur des Kerns, dem Durchmesser der Löcher, dem Grundmaterial, dem Material in den Löchern oder der Form der Löcher. Die Formänderung kann auf einer Verformung aufgrund von Spannungen während des Ziehens der Fasern beruhen. Der Mangel an höherer Rotationssymmetrie kann sich aus einer Veränderung über den Querschnitt der Faser in einem der folgenden Punkte in Verbindung mit einem oder mehreren der folgenden Punkte oder mit einer Veränderung eines anderen Parameters ergeben: Der Mikrostruktur des Kerns, dem Durchmesser der Löcher, dem Grundmaterial, dem Material in den Löchern oder der Form der Löcher.

**[0021]** Die doppelbrechende Faser kann eine Form-Doppelbrechung und/oder eine Spannungs-Doppelbrechung aufweisen. Die Form-Doppelbrechung reicht zwar in Standardfasern nicht aus, um die erforderliche kurze Schwebungslänge zu erreichen, der potentiell viel größere Brechungsindexkontrast in Photonenkristallfasern kann jedoch zu einer starken Form-Doppelbrechung führen. Es ergibt sich ein neuer Effekt, der in Standardfasern nicht möglich ist, wenn das Muster an Spannungen in der Faser während des Ziehprozesses einige der Luftlöcher verzerrt, die den Faserkern längs einer Achse umgeben, was zu einer zusätzlichen Doppelbrechung führt.

**[0022]** Das Verfahren zur Herstellung einer doppelbrechenden Photonenkristallfaser umfaßt die folgenden Schritte:

- (a) Ausbilden eines Stapels von Stäben, von denen wenigstens einige Kapillaren sind, wobei der Stapel Stäbe, die so angeordnet sind, daß sie in der Faser einen Kernbereich bilden, und Stäbe

umfaßt, die so angeordnet sind, daß sie in der Faser einen Mantelbereich bilden; und  
(b) Ziehen des Stabstapels zu einer doppelbrechenden Faser, die um eine Längsachse eine höchstens zweifache Rotationssymmetrie aufweist.

**[0023]** Die Doppelbrechung wird somit durch eine Modifikation des Verfahrens erzeugt, das zum Herstellen der Vorform für die Photonenkristallfaser verwendet wird. Die Modifikation des Herstellungsverfahrens kann aus einer Verringerung der Materialsymmetrie auf ein höchstens zweifaches Symmetriemerkmal im periodischen Stapel von Stäben bestehen, die die Vorform bilden. Eine solche Struktur verändert im allgemeinen sowohl die Form der geführten Mode als auch das Spannungsmuster in der Photonenkristallstruktur.

**[0024]** Eine Möglichkeit zur Erzeugung der Doppelbrechung ist das Einschließen von verschiedenen Kapillaren in die Vorform an zweifachen Symmetriepaaren von Gitterplätzen. Diese Einschlüsse können sich in der Nähe des Kerns befinden, um die Form der geführten Mode zu ändern ("Form-Doppelbrechung"), oder sie können vom Kern weiter weg sein, jedoch aus einem Material mit anderen Eigenschaften bestehen, um so das Spannungsmuster im Faserkern zu verändern ("Spannungs-Doppelbrechung"). Die Vorform kann so aufgebaut sein, daß die Doppelbrechung dadurch erzeugt wird, daß wesentliche Teile der Faser-Vorform mit einer anderen Art von Kapillaren gebildet werden, was sowohl eine Spannungs- als auch eine Form-Doppelbrechung hervorbringt. Das periodische Grundgitter, das den Wellenleiternmantel bilden, kann ein einfaches eng gepacktes Array von Kapillaren mit nominell identischen Außendurchmessern sein oder ein Array von Kapillaren mit im allgemeinen verschiedenen morphologischen Eigenschaften, die verschiedene periodische Strukturen bilden. Aus Kapillaren und Stäben mit verschiedenen Durchmessern kann ein quadratisches Gitter gebildet werden. Quadratische und rechteckige Gitter können dazu verwendet werden, natürlich doppelbrechende Kristallstrukturen für den Mantel aufzubauen, wodurch sich die Konstruktion von polarisationsbewahrenden Photonenkristallfasern vereinfacht.

**[0025]** Der Mangel an höherer Rotationssymmetrie kann zumindest zum Teil das Ergebnis sein von Veränderungen, über den Querschnitt des Stapels, im Innendurchmesser der Kapillaren, im Material, aus dem die Stäbe sind, im Material, mit dem die Kapillaren gefüllt sind, und/oder im Außendurchmesser der Stäbe.

**[0026]** An den Ecken eines Mantelgitters mit einer höchstens zweifachen Rotationssymmetrie um den Mittelpunkt der Stäbe für den Kern können Stäbe vor-

gesehen sein. An den Ecken eines Mantelgitters mit einer höchstens zweifachen Rotationssymmetrie um den Mittelpunkt der Stäbe für den Kern können Kapillaren mit ausgewählten Innendurchmessern vorgesehen sein, wobei die ausgewählten Durchmesser der Kapillaren an den Ecken des Mantelgitters verschieden sind von den Durchmessern der Kapillaren an anderen Stellen.

**[0027]** Eine wesentliche Anzahl von Mantelstäben in der Nähe der Stäbe für den Kern können verschieden sein.

**[0028]** Die Doppelbrechung kann sich zumindest teilweise aus Spannungen ergeben, die sich beim Ziehen in der Faser ergeben. Die Spannungen können durch das Vorsehen eines Stabes aus einem anderen Material als für wenigstens einige der anderen Stäbe im Gitter an Stellen mit einer höchstens zweifachen Rotationssymmetrie erzeugt werden. Die Spannungen können durch das Vorsehen von Kapillaren mit einer anderen Kapillarwanddicke als bei wenigstens einigen der anderen Kapillaren an Stellen mit einer höchstens zweifachen Rotationssymmetrie erzeugt werden.

**[0029]** Die Spannungen können zu Verformungen der Löcher führen, die den Kern der gezogenen Faser umgeben, wobei diese Verformungen zur Doppelbrechung führen können.

**[0030]** Die Spannungen können zu Spannungen im Kern der gezogenen Faser führen, wobei diese Spannungen zur Doppelbrechung führen können.

**[0031]** Der Mangel an einer höheren Rotationssymmetrie kann sich zumindest zum Teil daraus ergeben, daß wenigstens eine der Kapillaren während des Ziehens des Stapels unter Druck gesetzt oder evakuiert wird.

**[0032]** Bei jedem der genannten Verfahren ist die Rotationssymmetrie des Stapels aus Stäben vorzugsweise eine zweifache Rotationssymmetrie.

**[0033]** Erfindungsgemäß wird auch ein Verfahren zum Herstellen einer Photonenkristallfaser geschaffen, das umfaßt:

- (a) Bereitstellen einer Anzahl von länglichen Stäben mit jeweils einer Längsachse, einem ersten Ende und einem zweiten Ende, wobei wenigstens einige der Stäbe Kapillaren sind mit einem Loch parallel zur Längsachse des Stabes, das sich vom ersten Ende des Stabes zum zweiten Ende des Stabes erstreckt;
- (b) Anordnen der Stäbe zu einem Stapel, wobei die Stäbe mit ihrem Längsachsen im wesentlichen parallel zueinander und parallel zur Längsachse des Stapels ausgerichtet werden;
- (c) Ziehen des Stapels zu einer Faser, während

das Loch mindestens einer Kapillare im Verbindung mit einer Fluidquelle auf einem ersten Druck gehalten wird und der Druck um die Kapillare herum auf einem zweiten Druck gehalten wird, der vom ersten Druck verschieden ist, wobei das Loch mit dem ersten Druck während des Ziehprozesses eine andere Größe annimmt als es ohne den Druckunterschied angenommen hätte.

**[0034]** Bei dem neuen Verfahren können kontrolliert wesentliche Änderungen in der Faserstruktur auftreten, während diese gezogen wird; zum Beispiel können sich die Luftlöcher während des Ziehens kontrolliert erweitern. Bei den bekannten Photonenkristallfasern wurde die erforderliche Mikrostruktur im makroskopischen Maßstab erzeugt und dann durch das Ziehen zu einer Faser verkleinert.

**[0035]** Vorzugsweise umgibt ein Rohr den Stapel von Stäben über zumindest einen Teil ihrer Länge, wobei das Innere des Rohrs auf dem zweiten Druck gehalten wird.

**[0036]** Der Ausdruck "Erweiterung der Luftlöcher" bezeichnet die Erzeugung von Luftlöchern einer Größe (im Querschnitt senkrecht zur Längsachse der Kapillaren), die größer ist als die ohne den Druckunterschied. In der Realität weist eine durch Ziehen hergestellte Faser eine sehr viel kleinere Gesamt-Querschnittsfläche auf wie die Vorform (hier der Stapel aus Stäben), aus der sie gemacht wird, so daß sich die Luftlöcher bei der Erfindung absolut gesehen im allgemeinen nicht "erweitern".

**[0037]** Die Veränderungen beim Ziehen können somit auf zwei Arten kontrolliert werden: Durch die Anwendung eines Druckunterschieds auf bestimmte Löcher, und durch das Umschließen der gesamten Vorform, vorzugsweise durch ein Rohr, das vorzugsweise dickwandig ist und Siliziumoxid umfassen kann und mit der Faser ausgezogen wird und einen Teil der fertigen Faser bildet. Vorzugsweise erfährt das Rohr keine Verformungen, die sich erheblich von denen unterscheiden, die es ohne den Druckunterschied erfahren würde.

**[0038]** Vorzugsweise schränkt das Rohr die Erweiterung wenigstens eines der Löcher mit dem ersten Innendruck ein.

**[0039]** Vorzugsweise weist der Stapel von Stäben eine höchstens zweifache Rotationssymmetrie um eine der Längsachsen auf. Ein solcher Stapel kann zum Ziehen einer doppelbrechenden Faser verwendet werden.

**[0040]** Vorzugsweise wird während des Ziehprozesses das Rohr mit dem ersten Ende einer evakuierbaren Struktur dicht verbunden, wobei sich das zweite Ende

des Rohrs in der evakuierbaren Struktur befindet; wobei einige der Kapillaren durch die evakuierbare Struktur verlaufen und mit dem zweiten Ende davon dicht verbunden sind; und die evakuierbare Struktur im wesentlichen evakuiert, um den zweiten Innendruck zu erzeugen.

[0041] Vorzugsweise ist die evakuierbare Struktur ein Metallrohr.

[0042] Beispielhaft wird nun eine Ausführungsform der Erfindung mit Bezug zu den beiliegenden Zeichnungen näher beschrieben. Es zeigen:

[0043] [Fig. 1](#) eine schematische Darstellung eines Beispiels für eine Standardfaser.

[0044] [Fig. 2](#) eine schematische Darstellung einer herkömmlichen Photonenkristallfaser mit einem Kerndefekt mit hohem Index.

[0045] [Fig. 3](#) eine schematische Darstellung einer herkömmlichen Photonenkristallfaser (einer photonischen Bandlückenfaser) mit einem Kerndefekt mit kleinem Index.

[0046] [Fig. 4](#) eine schematische Darstellung einer Photonenkristallfaser-Vorform, die teilweise zu einer Faser ausgezogen wurde.

[0047] [Fig. 5](#) eine schematische Darstellung des Querschnitts durch eine erste polarisationsbewahrende Photonenkristallfaser, bei der die Mantellöcher ein rechteckiges Gitter bilden.

[0048] [Fig. 6](#) eine schematische Darstellung des Querschnitts durch eine zweite polarisationsbewahrende Photonenkristallfaser, bei der das Muster der Mantellöcher in der Nähe des Kerns eine zweifache Symmetrie aufweist.

[0049] [Fig. 7](#) eine schematische Darstellung des Querschnitts durch eine dritte polarisationsbewahrende Photonenkristallfaser, bei der das Muster der Mantellöcher weit weg vom Kern eine zweifache Symmetrie aufweist.

[0050] [Fig. 8](#) eine schematische Darstellung des Querschnitts durch eine vierte polarisationsbewahrende Photonenkristallfaser, bei der das Muster von dielektrischen Einschlüssen im Kern des Gitters eine zweifache Symmetrie aufweist.

[0051] [Fig. 9](#) eine schematische Darstellung des Querschnitts durch eine Anordnung von Stäben zum Ausbilden einer Photonenkristallfaser mit einem quadratischen Gitter.

[0052] [Fig. 10](#) eine schematische Darstellung des Querschnitts durch einen Teil einer Photonenkristall-

faser mit einem quadratischen Gitter von Löchern mit jeweils einem von zwei verschiedenen Durchmessern.

[0053] [Fig. 11](#) eine Photonenkristallfaser mit einem quadratischen Gitter.

[0054] [Fig. 12](#) Stäbe, die einen Teil eines Stapels zum Ausbilden einer Photonenkristallfaser bilden.

[0055] [Fig. 13](#) eine Photonenkristallfaser, die aus einem Stapel von Stäben wie in der [Fig. 12](#) gezeigt gebildet wurde.

[0056] [Fig. 14](#) schematisch einen Stapel von Kapillaren, die für die Verwendung bei einem weiteren erfindungsgemäßen Verfahren geeignet sind;

[0057] [Fig. 15](#) schematisch eine Vorrichtung, die bei dem Stapel der [Fig. 14](#) verwendet wird;

[0058] [Fig. 16a](#) die gespaltene Endfläche einer Photonenkristallfaser aus einer Vorform ähnlich der der [Fig. 14](#) und mit der Vorrichtung der [Fig. 15](#);

[0059] [Fig. 16b](#) ein Detail der Struktur der Faser der [Fig. 16a](#) in der Nähe des Kerns;

[0060] [Fig. 17a](#) eine stark doppelbrechende Faser, die mit der Vorrichtung der [Fig. 15](#) hergestellt wird; und

[0061] [Fig. 17b](#) die Polarisationssschwebung, die bei einer Wellenlänge von 1550 nm bei der Faser der [Fig. 17a](#) beobachtet wird.

[0062] Standardfasern wie das in der [Fig. 1](#) gezeigte Beispiel umfassen in ihrer einfachsten Form im wesentlichen einen zylindrischen Kern **10** und einen konzentrischen zylindrischen Mantel **20**. In der Regel bestehen sowohl der Kern als auch der Mantel aus dem gleichen Material, gewöhnlich Siliziumoxid, wobei jedoch der Kern und der Mantel jeweils mit anderen Materialien dotiert sind, um den Brechungsindex des Kerns **10** anzuheben und den Brechungsindex des Mantels **20** zu verringern. Licht geeigneter Wellenlänge wird auf den Kern **10** beschränkt und darin durch die innere Totalreflexion an der Kern-Mantel-Grenze **15** geführt.

[0063] Die in der [Fig. 2](#) gezeigte typische Photonenkristallfaser besteht aus einem Zylinder aus transparentem Grundmaterial **30** (z.B. Siliziumoxid) mit einem Gitter von zylindrischen Löchern **40**, die über dessen Länge verlaufen. Die Löcher sind an den Ecken und in den Mittelpunkten von regelmäßigen Sechsecken angeordnet, die eine sechsfache Rotationsymmetrie aufweisen. Die Löcher haben eine regelmäßige Periode, die unterbrochen wird durch das Weglassen eines Loches in der Nähe des Mittelpunk-

tes der Faser. Der Bereich **50** der Faser um die Stelle des fehlenden Lochs hat den Brechungsindex des Grundmaterials **30**. Der Brechungsindex des Restes der Faser setzt sich zusammen aus dem Brechungsindex des Grundmaterials **30** und der Luft in den Löchern **40**. Der Brechungsindex von Luft ist kleiner als der von zum Beispiel Siliziumoxid, folglich ist der 'effektive Brechungsindex' des Materials mit den Löchern kleiner als der des Bereichs **50** um das fehlende Loch. In der Faser kann daher auf eine analoge Art wie bei der Wellenleitung durch die innere Totalreflexion in den Standardfasern Licht etwa auf den Bereich **50** begrenzt werden. Der Bereich **50** wird daher als der 'Kern' der Photonenkristallfaser bezeichnet.

**[0064]** In einer anderen Form einer Photonenkristallfaser dient eine photonische Bandlückenführung zur Begrenzung des Lichts auf den 'Kern' der Faser. Bei dem in der [Fig. 3](#) gezeigten Beispiel für eine solche Faser ist im Grundmaterial **30** eine Matrix von Löchern **70** ausgebildet. Die Löcher sind an den Ecken (jedoch nicht in den Mittelpunkten, vergleiche [Fig. 2](#)) von regelmäßigen Sechsecken angeordnet, die eine sechsfache Rotationssymmetrie aufweisen. Die Regelmäßigkeit der Matrix wird wieder durch einen Defekt unterbrochen, der bei dem gezeigten Beispiel aus einem zusätzlichen Loch **60** im Mittelpunkt von einem der Gittersechsecke besteht, dem Sechseck in der Nähe des Mittelpunktes der Faser. Der Bereich um das zusätzliche Loch **60** kann wieder als Kern der Faser bezeichnet werden. Wenn man (für den Moment) das Loch **60** beiseiteläßt, führt die Periodizität der Löcher in der Faser zu einer Bandlücke in den Ausbreitungskonstanten des Lichts, das sich in der Faser ausbreitet. Das Hinzufügen des Lochs **60** erzeugt einen Bereich mit einer anderen Periodizität, so daß dieser Bereich andere Ausbreitungskonstanten aufweist als der Rest der Faser. Wenn einige der Ausbreitungskonstanten im Bereich der Lochs **60** in die Bandlücke der Ausbreitungskonstanten fallen, die für den Rest der Faser verboten ist, dann ist Licht mit diesen Ausbreitungskonstanten auf den Kern begrenzt und pflanzt sich darin fort. Da das Loch **60** ein Defekt mit einem niedrigen Index ist (es befindet sich Luft dort, wo sonst Grundmaterial ist), ist bei dem gezeigten Beispiel kein innerer Totalreflexionseffekt für die Wellenleitung verantwortlich.

**[0065]** Photonenkristallfasern können mit einem Prozeß hergestellt werden, von dem eine Stufe in der [Fig. 4](#) gezeigt ist. In den (nicht gezeigten) ersten Stufen dieses Prozesses wird ein Zylinder des Grundmaterials (z.B. Siliziumoxid) so bearbeitet, daß er einen sechseckigen Querschnitt erhält, und es wird ein Loch entlang des Mittelpunktes gebohrt. Die Stange wird dann in einem Faserziehturm zu einem Stab ausgezogen. Der Stab wird abgelängt und die sich ergebenden kurzen Stäbe **80** werden aufeinandergelegt, um wie in der [Fig. 4](#) gezeigt ein Array von Stäben zu bilden. Der Stab **100** in der Mitte des gezeigten

ten Arrays ist keine Kapillare; d.h. er besitzt kein Loch; das gezeigte Array bildet eine Faser vom Effektivindex-Führungstyp. Das Array von Stäben **80** wird miteinander verschmolzen und dann in die fertige Photonenkristallfaser **110** ausgezogen.

**[0066]** Die in der [Fig. 5](#) gezeigte Faser weist ein Gitter **120** von Löchern auf, die an den Ecken von Rechtecken angeordnet sind, die keine Quadrate sind. Die Periodizität wird durch die Weglassung des Lochs im Bereich **125** in der Nähe des Mittelpunkts des Faserquerschnitts unterbrochen. Der Mittenabstand (die Teilung) der Löcher ist parallel zur Achse  $x$  (Mittenabstand  $\Lambda_x$ ) ein anderer als parallel zur Achse  $y$  (Mittenabstand  $\Lambda_y$ ). Die in der [Fig. 5](#) gezeigte Faser kann mit einem Stab hergestellt werden, der so bearbeitet ist, daß er einen rechteckigen Querschnitt besitzt. Das Gitter der [Fig. 5](#) weist eine zweifache Rotationssymmetrie auf und ist daher doppelbrechend.

**[0067]** Die [Fig. 6](#) und [Fig. 7](#) zeigen Photonenkristallfasern, die ähnlich wie die Faser der [Fig. 2](#) Effektivindex-Führungsfasern mit einem hexagonalen Gitter sind. Solche Gitter sind nicht von Haus aus doppelbrechend. In den Gittern der [Fig. 6](#) und [Fig. 7](#) sind jedoch Löcher **140** mit einem größeren Durchmesser als der der Löcher **130** vorgesehen. Die sich ergebende Anisotropie im Gitter erzeugt ein zweifach rotationssymmetrisches Muster von Löchern um den Bereich **135**, in dem im Gitter ein Loch fehlt.

**[0068]** Das Muster der großen Löcher **140** in der [Fig. 6](#) erzeugt einen Effekt, der analog zu dem der Form-Doppelbrechung in einer Standardfaser ist. Die Änderung des Lochdurchmessers in der Nähe des 'Kerns' **135** bewirkt direkt eine Änderung im effektiven Index, der von einer geführten Mode gesehen wird.

**[0069]** Das Muster der großen Löcher **140** in der [Fig. 7](#) erzeugt Spannungen im Kern, die auf die gleiche Weise, wie in Standardfasern Doppelbrechung erzeugt wird, eine Doppelbrechung hervorrufen. Ein neuer, in Standardfasern nicht möglicher Effekt ist, daß das Spannungsmuster in der Faser während des Ziehprozesses einige der Luftlöcher um den Faserkern **135** längs einer Achse verzerren kann, wodurch zusätzliche Doppelbrechung entsteht.

**[0070]** Eine weitere, in der [Fig. 8](#) gezeigte Alternative ist es, einige der Löcher **150** mit einem Material zu füllen, das nicht Luft ist (so daß sie eine andere Dielektrizitätskonstante aufweisen). Wieder wird die sechsfache Rotationssymmetrie des Gitters auf eine zweifache Rotationssymmetrie verringert.

**[0071]** Der in der [Fig. 9](#) gezeigte Stapel Stäbe besteht aus drei Arten davon: Stäbe **160** mit großem Durchmesser, die Kapillaren sind, Vollstäbe **170** mit kleinem Durchmesser und ein Vollstab **180** mit gro-



ßem Durchmesser. Die Stäbe sind so angeordnet, daß die Stäbe **160** mit großem Durchmesser ein quadratisches Gitter bilden, das von einem Defekt in der Mitte unterbrochen wird, wobei der Defekt der Vollstab **180** mit großem Durchmesser ist. Die Zwischenräume, die sich durch die nicht würfelförmige Art der kreisförmigen Querschnitte der Stäbe **160** ergeben, werden mit den Stäben **170** mit kleinem Durchmesser gefüllt.

[0072] In der [Fig. 10](#) ist eine Photonenkristallfaser mit einer zweifachen Symmetrie gezeigt. Die Faser weist eine Gitterstruktur auf, die aus einem Stapel Stäbe hergestellt werden kann, der auf eine ähnliche Weise wie der Stapel der [Fig. 9](#) angeordnet ist. Der Vollstab **180** ergibt einen Defekt, der dem Defekt **210** ähnlich ist. In diesem Fall haben jedoch abwechselnde Reihen von Löchern (**190**, **200**) jeweils einen großen bzw. kleinen Durchmesser. Ein solcher Effekt kann mit dem Gitter der [Fig. 9](#) dadurch erreicht werden, daß abwechselnd Reihen von Stäben **160** mit großem bzw. kleinem Innendurchmesser (jedoch mit gleichen Außendurchmessern) vorgesehen werden.

[0073] Die Faser der [Fig. 11](#) weist wie ersichtlich ein in etwa quadratisches Gitter auf, das mit dem Stapel der [Fig. 9](#) hergestellt werden kann.

[0074] Die [Fig. 12](#) zeigt einen Stapel Stäbe **220**, die Kapillaren sind. Die Stäbe sind in einem hexagonalen Gitter angeordnet, wobei die Periodizität der Struktur durch einen Vollstab **240** unterbrochen wird. Es ist anzumerken, daß eine Reihe von Stäben etwa halb oben in der Photographie Kapillaren mit dickeren Wänden **250** als die Wände **230** der anderen Kapillaren sind. Wenn aus dem Stapel Stäbe eine Faser gezogen wird, ergibt diese Anordnung eine Faser wie in der [Fig. 13](#) gezeigt mit einer Reihe von Löchern **260** mit kleinerem Durchmesser als andere Löcher in der Faser haben.

[0075] In den [Fig. 14](#) und [Fig. 15](#) ist ein weiteres Verfahren zum Herstellen einer Faser dargestellt. Ein Stapel mit einem regelmäßigen Array von Kapillaren **300** wird in einem dickwandigen Siliziumoxid-Glasrohr **310** angeordnet ([Fig. 14](#)). Das Siliziumoxid-Glasrohr **310** bildet nach dem Ziehen einen Teil der Faser und dient als Umhüllung, die für mechanische Festigkeit sorgt. Während des Ziehprozesses ([Fig. 15](#)) wird das Innere des Rohrs **310** durch dichtes Verbinden mit einer evakuierbaren Struktur evakuiert, während das Innere einiger oder aller Kapillaren **300** auf einem anderen und höheren Druck gehalten wird, zum Beispiel dadurch, daß sie gegenüber der Atmosphäre offen bleiben.

[0076] Die evakuierbare Struktur ist ein Messingzylinder **320**. Anfänglich ist er an beiden Enden offen. Der Zylinder wird dann an einem Ende dicht mit dem Rohr **310** verbunden. Das Rohr endet innerhalb des

Messingzylinders **320**. Einige oder alle der Kapillaren **300** verlaufen vollständig durch den Messingzylinder **320**, der dann um die Kapillaren verschlossen wird, die an der Oberseite vollständig durch den Zylinder verlaufen. Der Messingzylinder **320** wird während des Ziehprozesses evakuiert.

[0077] Während des Ziehprozesses, bei dem das Rohr **310** und die Kapillaren **300** aus dem Messingrohr nach unten gezogen werden, wird das äußere Rohr **310** trotz der Evakuierung nicht zusammengedrückt, da es dicke Wände besitzt. Im Gegensatz dazu werden die Zwischenraumlöcher zwischen den Kapillaren **300**, die kleiner sind und relative dünne Begrenzungen in der Form der Wände der Kapillaren haben, schnell kleiner und sind in der fertigen Faser nicht mehr vorhanden (was wünschenswert ist). Evakuierbare Kapillaren werden ebenfalls vollständig zusammengedrückt, wenn der Druck um die Kapillare größer ist. Andererseits weiten sich Kapillaren, die mit Luft unter Atmosphärendruck gefüllt sind.

[0078] Mit dem gerade beschriebenen Verfahren ist es möglich, sehr regelmäßige und dünnwandige Strukturen auszubilden und Fasern mit sehr kleinen führenden Kernen herzustellen. Die [Fig. 16](#) zeigt eine solche Faser mit einem äußeren Mantel **330**, der aus dem Rohr **310** nach dem Ziehen besteht, und einem inneren Mantel **340** aus den Kapillaren **300**. Der innere Mantel hat einen Radius von etwa 10 µm und besteht aus einer Wabenstruktur aus expandierten Löchern. Die Löcher umgeben einen führenden Kern **350** mit einem Durchmesser von etwa 1 µm, der aus einem länglichen Stab gebildet wurde, der keine Kapillare war. Die in der [Fig. 16](#) gezeigte Faser wurde dadurch hergestellt, daß alle Kapillaren **300** vollständig durch den Zylinder **320** geführt wurden. Sie weist eine mehrfache Rotationssymmetrie auf; die Faser ist daher im wesentlichen nicht doppelbrechend.

[0079] Im Gegensatz dazu zeigt die [Fig. 17a](#) eine erfindungsgemäße Faser, die dadurch stark doppelbrechend ausgebildet wurde, daß an bestimmten Stellen dickwandigere Kapillaren aufgestapelt wurden; an diesen Stellen haben sich kleinere Luftlöcher **360** gebildet. Das erfindungsgemäße Verfahren ergibt mit vier ausgewählten Kapillaren, die im Zylinder **320** enden, die in der [Fig. 17a](#) gezeigte Faser; die Löcher in diesen ausgewählten Kapillaren **300** erweitern sich beim Ziehen nicht und ergeben daher die vier kleinen Löcher **360**. Die Faser der [Fig. 17a](#) ist stark doppelbrechend, da sie aufgrund der vier kleineren Löcher **360**, die auf beiden Seiten des Kerns auf dem Durchmesser des inneren Mantels liegen, nur eine zweifache Symmetrie aufweist.

[0080] Die [Fig. 17b](#) zeigt die Polarisations-schwebungsdaten der Faser der [Fig. 17a](#). Aus diesen Daten ergibt sich die Schwebungslänge der Faser bei einer Wellenlänge von 1550 nm zu 0,92 mm. Eine



solche Schwebungslänge ist ausreichend klein, damit die Faser als polarisationsbewahrende Monomode-Photonenkristallfaser dienen kann.

### Patentansprüche

1. Verfahren zur Herstellung einer Photonenkristallfaser, umfassend:

a) Herstellen einer Vorform mit Löchern;

b) Ziehen der Vorform zu einer Faser;

**dadurch gekennzeichnet**, daß das Verfahren folgenden Schritt aufweist:

c) Anlegen eines Druckunterschieds an bestimmte Löcher, um während des Ziehens Änderungen in der Faserstruktur zu steuern.

2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei die Vorform in ein Rohr eingeschlossen wird, das mitgezogen wird und einen Teil der fertigen Faser bildet.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, wobei während des Ziehens eine kontrollierte Ausdehnung der Löcher stattfindet.

4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, umfassend: (i) Bereitstellen einer Anzahl von länglichen Stäben, die jeweils eine Längsachse, ein erstes Ende und ein zweites Ende aufweisen, wobei zumindest einige der Stäbe Kapillaren mit einem parallel zur Längsachse des Stabes vom ersten Ende des Stabes zum zweiten Ende des Stabes verlaufenden Loch sind; (ii) Herstellen der Vorform durch Anordnen der Stäbe zu einem Stapel, wobei die Stäbe mit ihren Längsachsen im wesentlichen parallel zueinander und parallel zur Längsachse des Stapels ausgerichtet werden; (iii) Ziehen des Stapels zur Faser, während das Loch mindestens einer Kapillare in Verbindung mit einer Fluidquelle auf einem ersten Druck gehalten wird, während der Druck um die Kapillare herum auf einem zweiten vom ersten Druck verschiedenen Druck gehalten wird, wobei das Loch mit dem ersten Druck während des Ziehprozesses eine andere Größe erreicht, als es ohne den Druckunterschied erreicht hätte.

5. Verfahren nach Anspruch 4, wobei ein Rohr mit einem ersten Ende und einem zweiten Ende den Stapel der Stäbe auf mindestens einem Teil ihrer Länge umgibt, und wobei das Innere des Rohrs auf dem zweiten Druck gehalten wird.

6. Verfahren nach Anspruch 5, wobei das Rohr die Ausdehnung von mindestens einem der Löcher mit dem ersten inneren Druck einschränkt.

7. Verfahren nach Anspruch 5 oder 6, wobei das Rohr keine Verformung erfährt, die sich wesentlich von derjenigen unterscheidet, die es ohne den Druckunterschied erfahren würde.

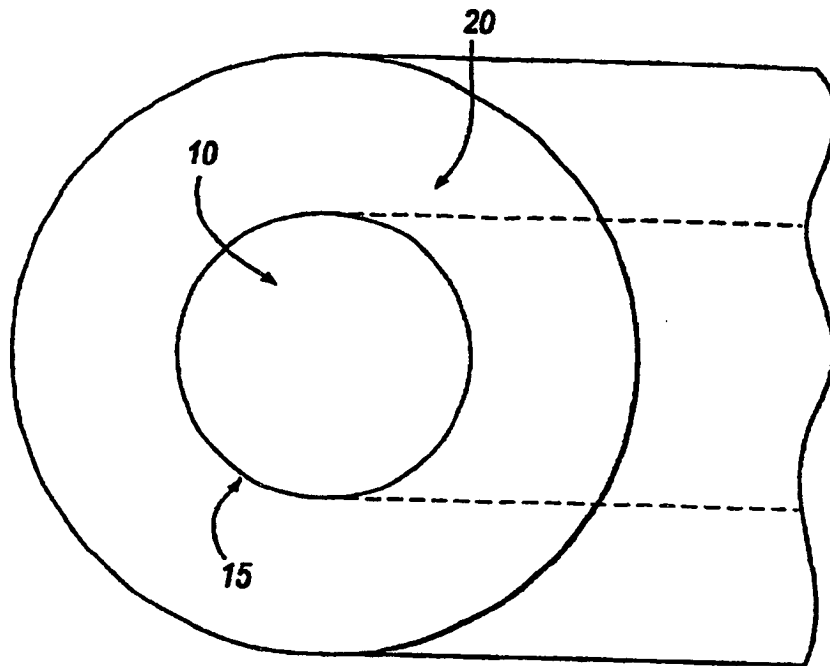
8. Verfahren nach einem der Ansprüche 5 bis 7, bei dem während des Ziehprozesses:

(A) das Rohr in der Nähe des ersten Endes dicht mit dem ersten Ende einer evakuierbaren Struktur verbunden wird und sich das zweite Ende des Rohrs innerhalb der evakuierbaren Struktur befindet; (B) mindestens einige der Kapillaren durch die evakuierbare Struktur hindurch verlaufen und dicht mit deren zweiten Ende verbunden werden; und (C) die evakuierbare Struktur im wesentlichen evakuiert wird, um den zweiten inneren Druck herzustellen.

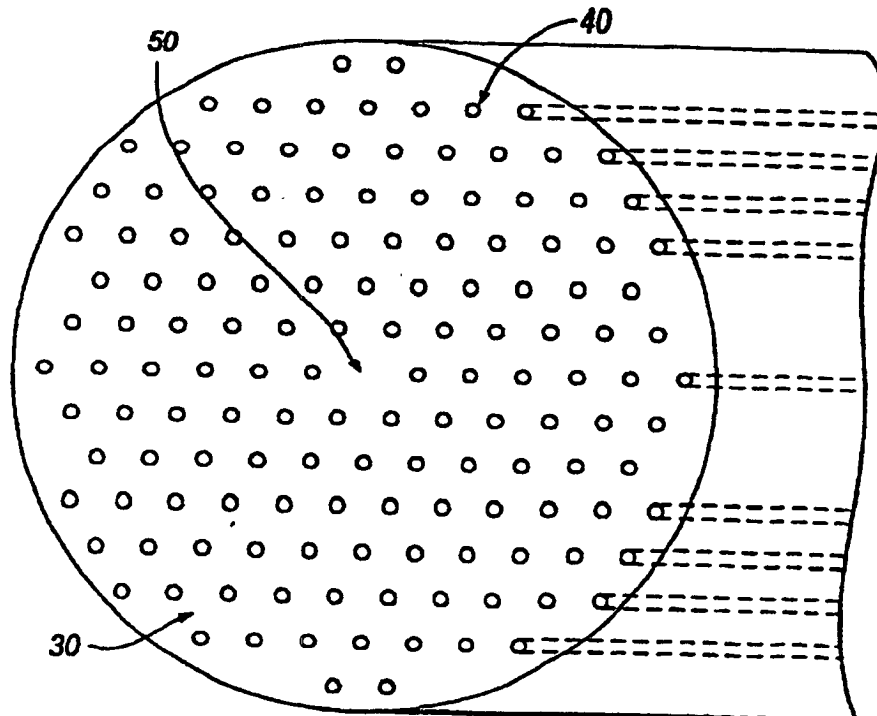
9. Verfahren nach Anspruch 8, wobei die evakuierbare Struktur ein Metallrohr ist.

10. Verfahren nach einem der Ansprüche 4 bis 9, bei dem die Vorform um eine der Längsachsen höchstens eine zweifache Rotationssymmetrie aufweist.

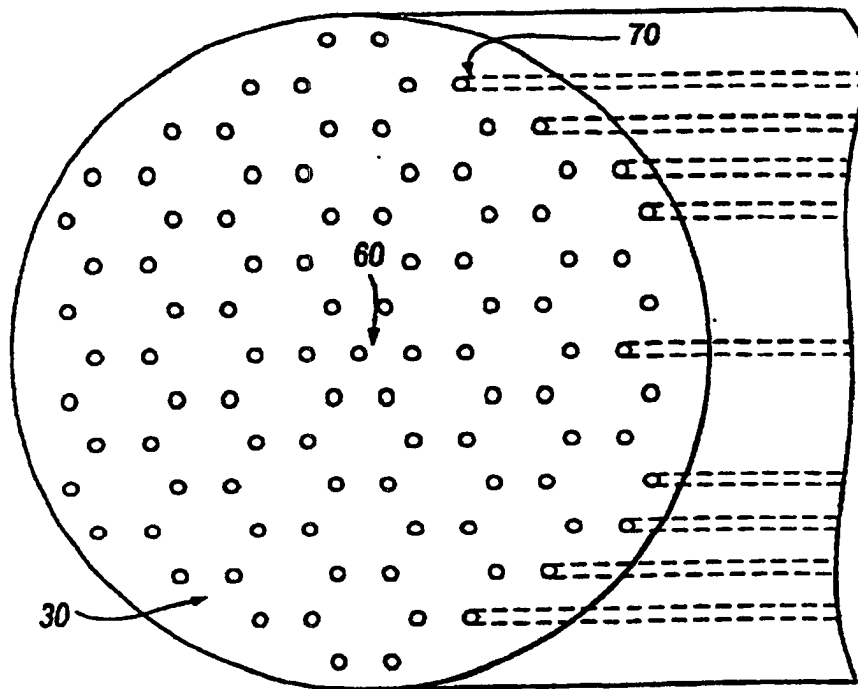
Es folgen 9 Blatt Zeichnungen



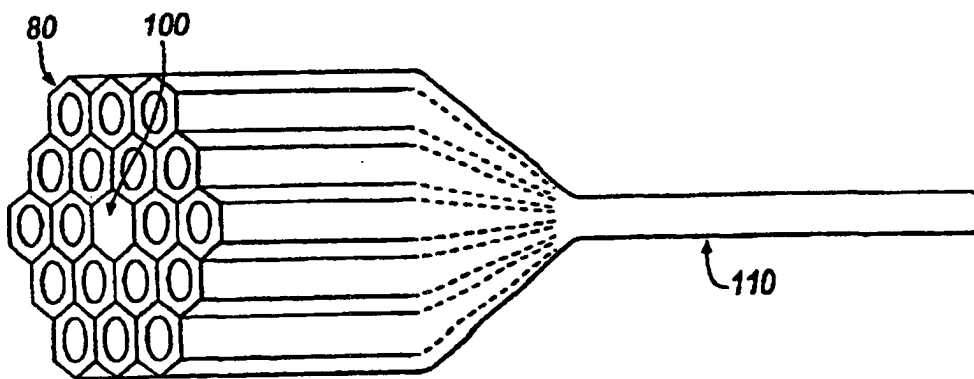
*Fig. 1*



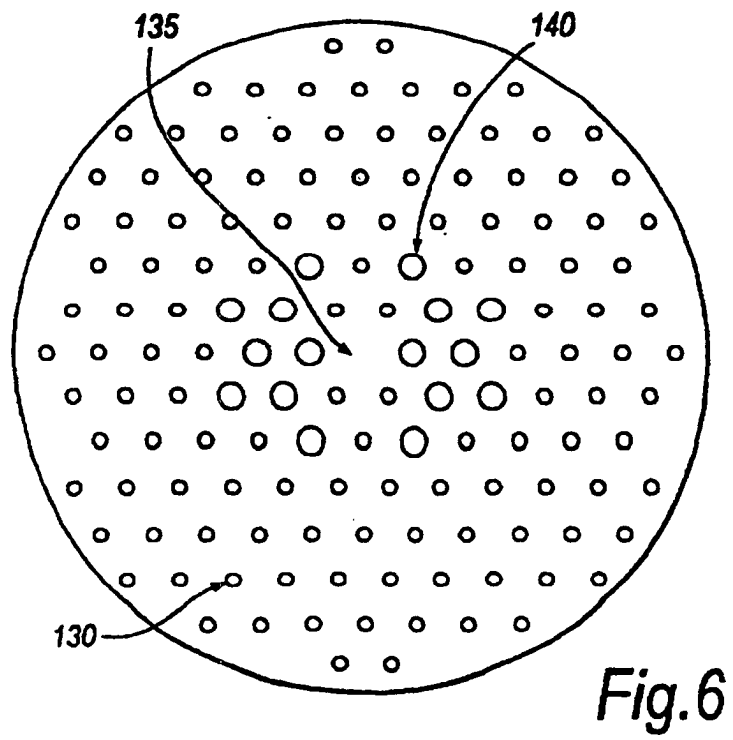
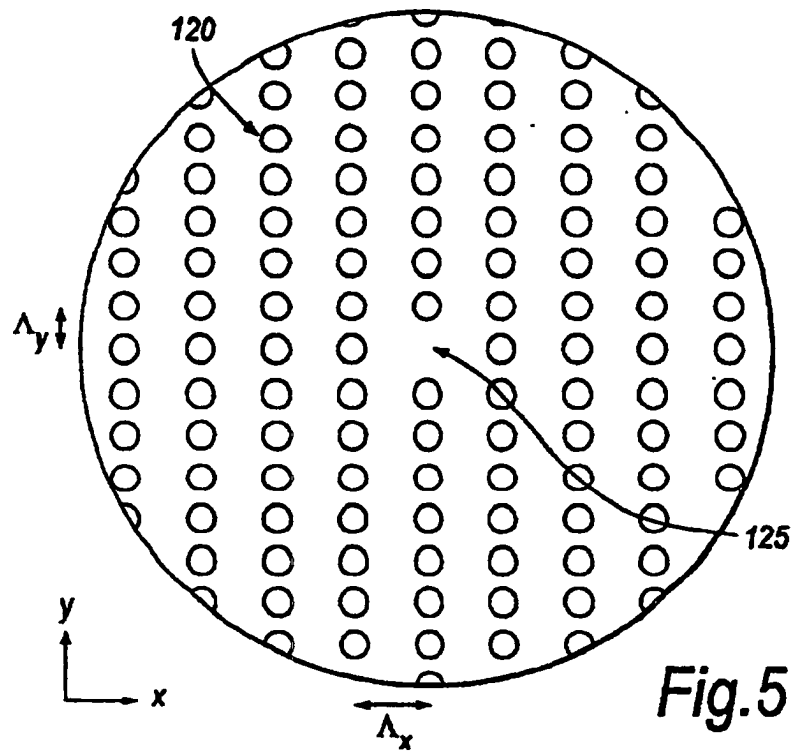
*Fig. 2*

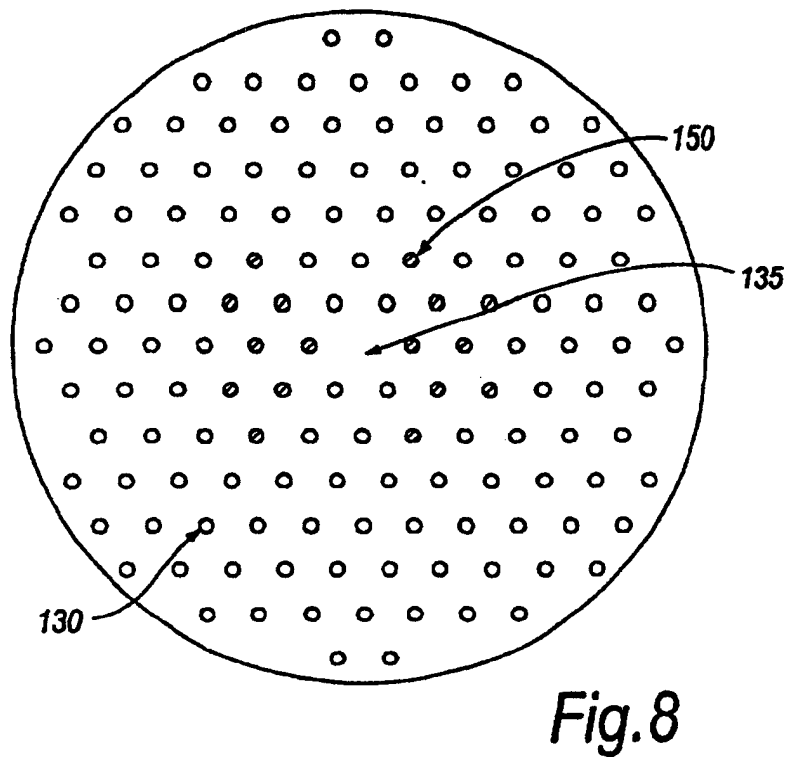
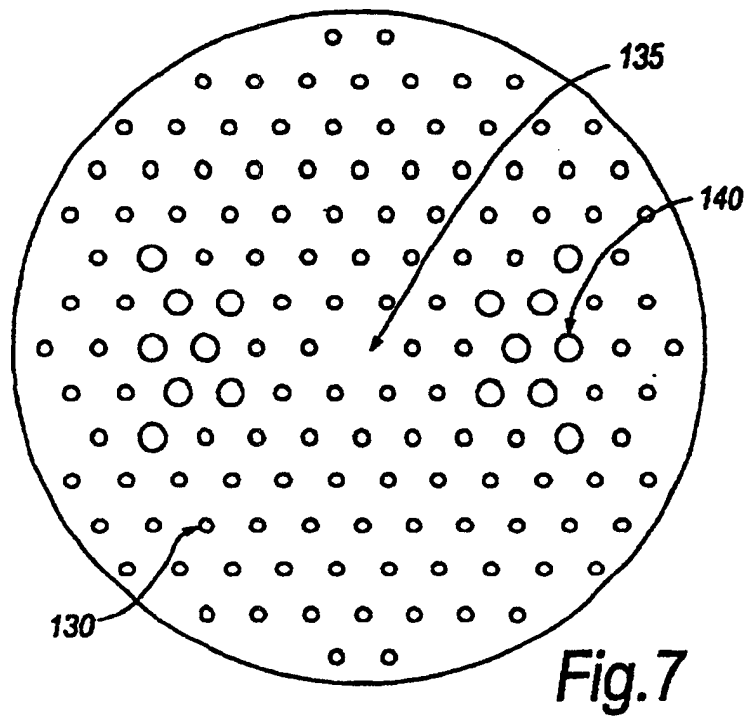


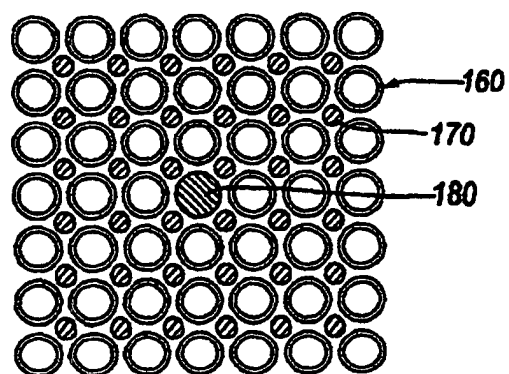
*Fig. 3*



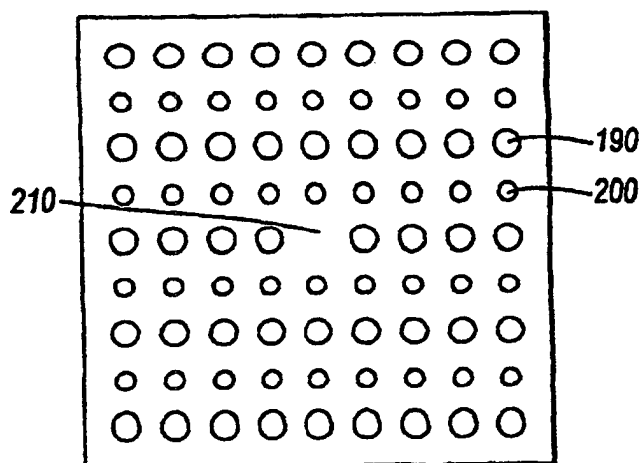
*Fig. 4*



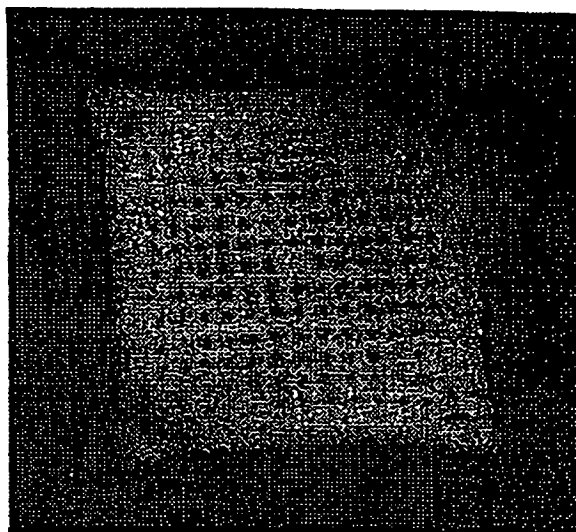




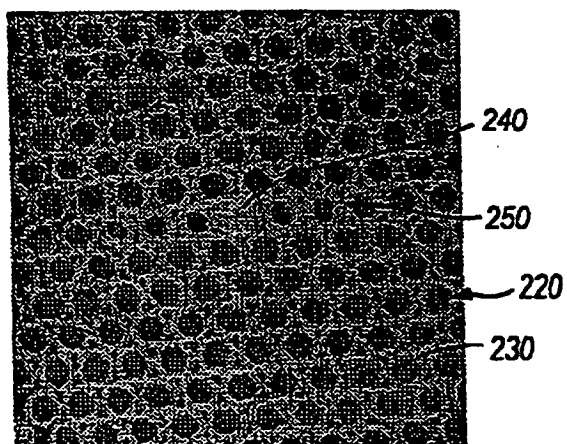
*Fig. 9*



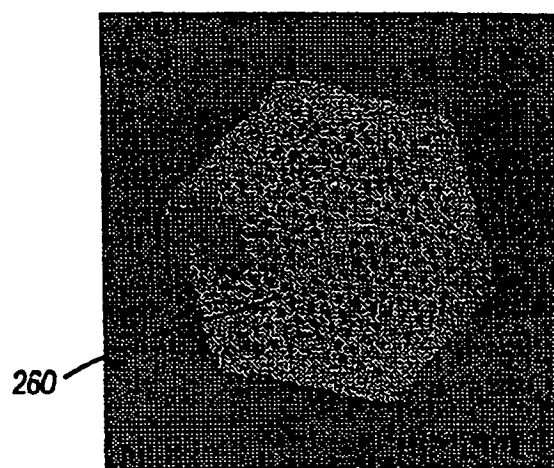
*Fig. 10*



*Fig.11*

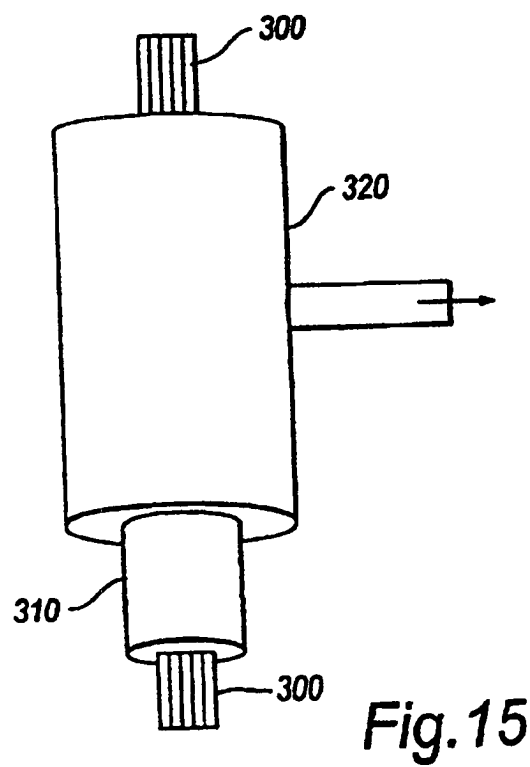
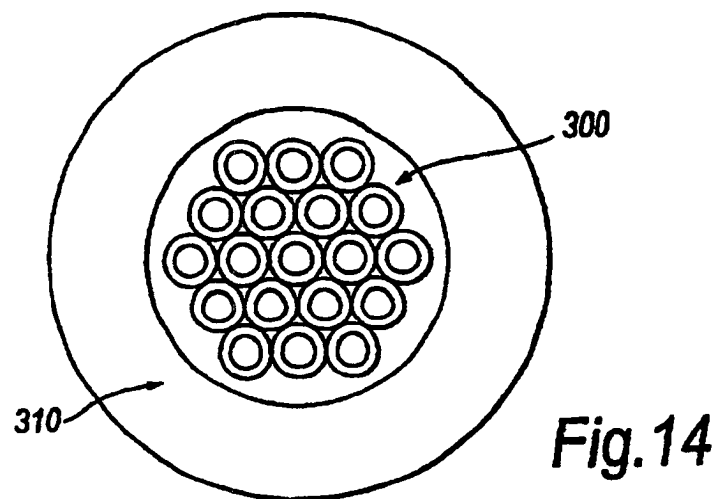


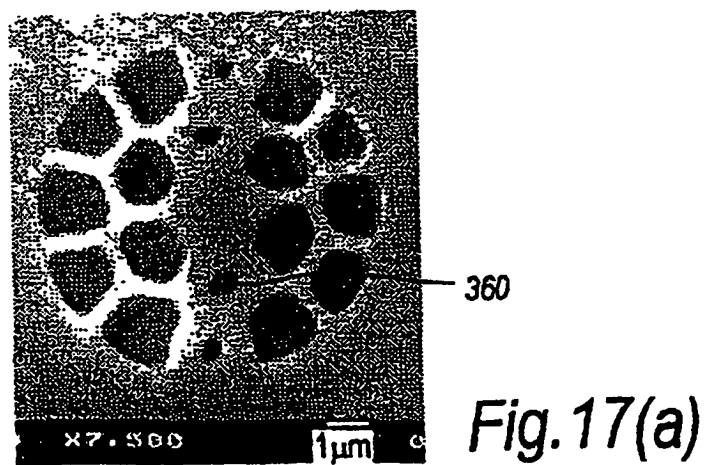
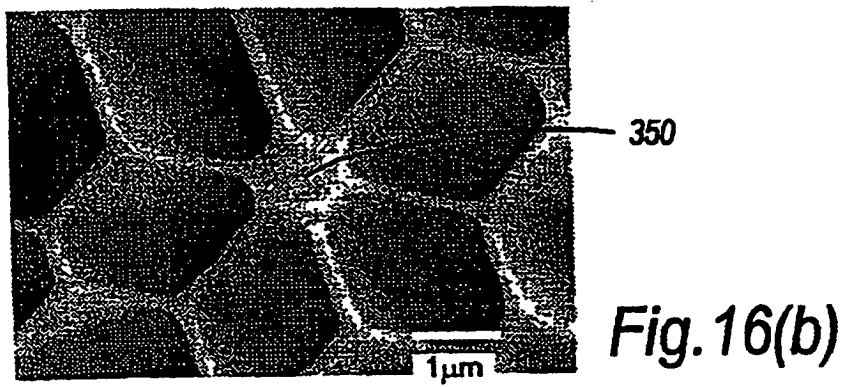
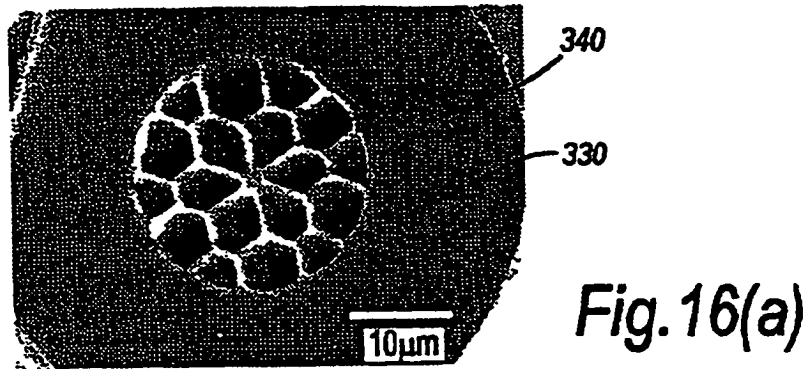
*Fig.12*

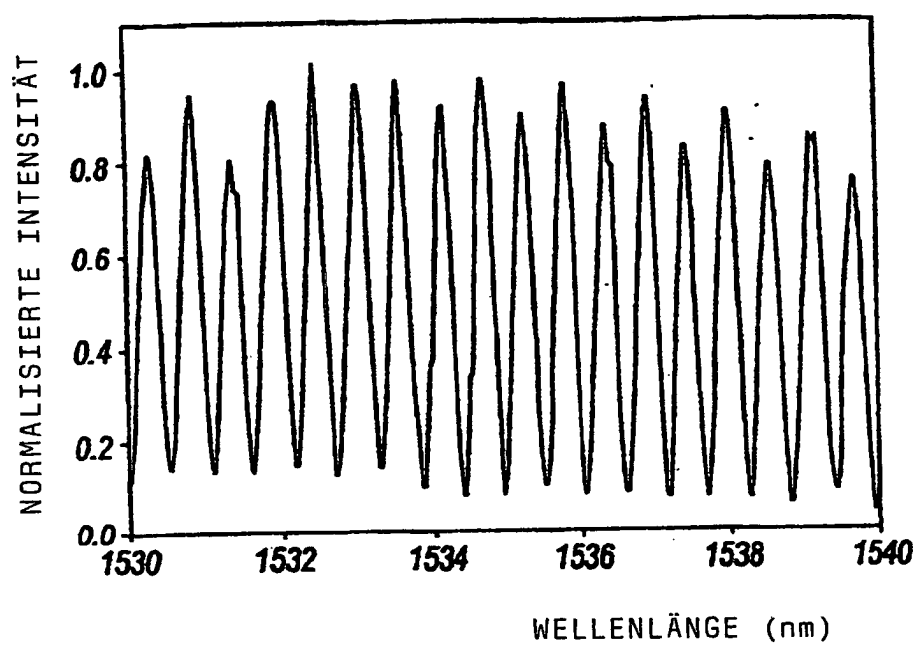


*Fig.13*









*Fig.17(b)*