

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公 開 特 許 公 報(A)

(11) 特許出願公開番号
特開2006-243735
(P2006-243735A)

(43) 公開日 平成18年9月14日(2006.9.14)

(51) Int.Cl.
G 0 2 B 6/02 (2006.01)

F I
G O 2 B 6/10 A

テーマコード (参考)
2 H O 5 O

審査請求 未請求 請求項の数 10 O L (全 21 頁)	
(21) 出願番号 特願2006-57130 (P2006-57130)	(71) 出願人 000005223 富士通株式会社 神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番1号
(22) 出願日 平成18年3月3日(2006.3.3)	(74) 代理人 100070150 弁理士 伊東 忠彦
(31) 優先権主張番号 05251330.6	(72) 発明者 マイケル チャールズ パーカー イギリス国, エセックス シーオー3 4 エイチジー, コールチェスター, バイロン アヴェニュー 38番
(32) 優先日 平成17年3月4日(2005.3.4)	(72) 発明者 久富 真紀子 イギリス国, サフォーク アイビー5 2 イーキュー, ケスグレーヴ, グランジ フ ァーム, ハートリー ウェイ, ウィルクス コート 23番
(33) 優先権主張国 欧州特許庁 (EP)	最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 光導波路及び光伝送方法

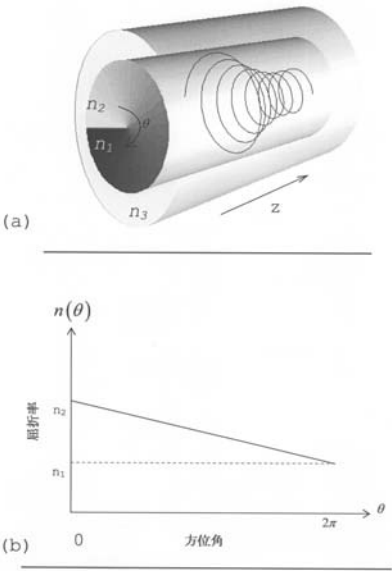
(57) 【要約】

【課題】 或る偏光性の軌道角運動量 $|1| \geq 1$ の光伝送をサポートするが、他の方向の偏光性の光伝送をサポートしないキラル導波路を提供すること。

【解決手段】 コア(20;30)を有する光導波路が使用される。コア(20;30)は半径方向に沿う不連続部(50;55)を有する屈折率を有し、該屈折率は方位角 θ が増えるにつれて不連続部(50;55)の第1側面での第1の値 n_2 から不連続部(50;55)の第2側面での第2の値 n_1 に変化する。

【選択図】 図3

光の軌跡を描いたキラル方位 GRIN ファイバの概略図 (a) 及びその屈折率特性 (b) を示す図



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

コアを有する光導波路であって、前記コアは半径方向に沿う不連続部を有する屈折率を有し、該屈折率は方位角 θ が増えるにつれて前記不連続部の第 1 側面での第 1 の値 n_2 から前記不連続部の第 2 側面での第 2 の値 n_1 に変化する

ことを特徴とする光導波路。

【請求項 2】

前記コアの中心部に、前記不連続部が延在していない領域を有する

ことを特徴とする請求項 1 記載の光導波路。

【請求項 3】

前記不連続部が、当該光導波路の長さ方向に沿って一様である

ことを特徴とする請求項 1 乃至 2 の何れか 1 項に記載の光導波路。

【請求項 4】

前記不連続部が、当該光導波路の長さ方向の全部又は一部に沿って回転している

ことを特徴とする請求項 1 乃至 3 の何れか 1 項に記載の光導波路。

【請求項 5】

当該光導波路の屈折率が半径方向に変化する

ことを特徴とする請求項 1 乃至 4 の何れか 1 項に記載の光導波路。

【請求項 6】

屈折率の変化によりファイバの横断面で同心状のゾーンを形成する

ことを特徴とする請求項 5 記載の光導波路。

【請求項 7】

前記同心状のゾーンがリングである

ことを特徴とする請求項 6 記載の光導波路。

【請求項 8】

半径方向に沿う複数の不連続部を有する

ことを特徴とする請求項 1 乃至 4 の何れか 1 項に記載の光導波路。

【請求項 9】

半径方向に沿う複数の不連続部が異なる方位角にある

ことを特徴とする請求項 8 記載の光導波路。

【請求項 10】

左回り又は右回りのゼロでない軌道角運動量を有する光を伝送する方法であって、請求項 1 乃至 9 の何れか 1 項に記載の光導波路に光を導入し、方位角を増やした場合の屈折率変化は、送信される光の偏光性を有する光の伝搬を支援する

ことを特徴とする方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は光ファイバを含む光導波路の技術分野に関する。

【背景技術】

【0002】

一般に光ファイバはガラス、プラスチック又はその他の適切な材料による非常に長い撚り線（ストランド）である。一般に光ファイバはその断面において環状のクラッドリングで包囲された中心のコア領域を有し、そのクラッドリングはしばしば環状のジャケットで包囲され、ファイバを力学的なダメージから保護する。光はコア及びクラッドリング間の屈折率の相違によりファイバの中に導かれる：クラッドリングはコアのものより低い屈折率を有し、コア-クラッドリング境界での内部全反射により、コアに導入された光をそこに閉じこめることができる。

【0003】

多種多様な光ファイバが知られている。例えば或るファイバは非常に複雑な階段状パタ

10

20

30

40

50

ーンの屈折率を有するクラッドイングを有し、また或るファイバは何らかの手法でコアから滑らかに変化する屈折率特性を有するクラッドイングを有する。或る複数のファイバの各々は1より多くのコアを有する。

【0004】

通常的にはコア及びクラッドイングの異なる屈折率はファイバ中のそれらの部分のドーパント濃度の相違から生じる；しかしながら或るファイバでは異なる屈折率がクラッドイング及びコアの中のホール分布の相違から生じる。そのようなファイバの例は「マイクロストラクチャファイバ」、「ホーリー(holey)ファイバ」又は「フォトリック結晶ファイバ」としばしば呼ばれる部類の導波路である。場合によってはファイバ中の光の案内は内部的な全反射によるものではなく、クラッドイング中のホール分布に起因するフォトリックバンドギャップの存在のような別の機構から生じる。

10

【0005】

マイクロストラクチャファイバの他の例は、屈折率の異なる同心(ソリッド)領域を有するクラッドイング領域を有する。

【0006】

最近、軌道角運動量(OAM: orbital angular momentum)に関する光の特性が注目を受けている。OAMは円偏光の高次形式と考えられ、その理由は円偏光は($\pm h$ バーの値をとる左回り及び右回り偏光の)2状態しかないからである：ここで h バーは $h/2\pi$ であり、 h はプランク定数である。それでも光のOAMは円対称性を有するが、 h バーの整数倍の値($\pm l h$ バー、 l は整数)をとることができる。更にOAMが導波路内で保存されるような「よじれた光(twisted light)」のような導波路の可能性に関する推察が存在する。

20

【0007】

更に、目覚ましい光の研究は科学的興味の増すテーマになりつつあり、光ピンセット(optical tweezer)として使用されたり暗号化データ伝送に使用されたりするかもしれない高い光角運動量(OAM)光子の生成に関する最近の説明をもたらす。

【特許文献1】米国特許6,573,813号明細書

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0008】

本発明の課題は或る偏光性(handedness)の軌道角運動量 $|l| \geq 1$ の光伝送はサポートするが、他の方向の偏光性の光伝送はサポートしないキラル(chiral)導波路を提供することである。

30

【課題を解決するための手段】

【0009】

本発明の一形態によれば、コアを有する光導波路がもたらされ、前記コアは半径方向に沿う不連続部を有する屈折率を有し、該屈折率は方位角 θ が増えるにつれて前記不連続部の第1側面での第1の値 n_2 から前記不連続部の第2側面での第2の値 n_1 に変化する。

【0010】

屈折率の不連続部は相対的に高い値 n_2 から相対的に低い値 n_1 へ非常に短い距離にわたって屈折率に変化する領域である：理論的には、2つの値の間で無限に急峻な変化に成るであろうが、当然に実際にはその変化は有限の距離にわたって生じる。

40

【0011】

半径方向に沿う不連続部はコアの中心(又は実質的に中心)から半径方向に伸びる不連続部である。半径方向に沿って境界がある不連続部はコアの中心から伸び始めてもよいし、半径状の別の地点から伸び始めてもよい。

【0012】

方位角 θ は或る半径に沿う不連続部(又は1より多くい場合は、何らかの選択された半径方向に沿う不連続部)と別の半径方向との間の角度である。

【0013】

屈折率の変化は、コア内の地点におけるローカルな屈折率の変化になるように設定され

50

てもよいし、ホーリー又は同様なマイクロストラクチャコアを有する導波路の場合には、コア内の地点における実効的な屈折率の変化になるように設定されてもよい（実効的な屈折率はローカルなマイクロストラクチャの正味の影響から生じる。）。

【0014】

屈折率は、第1の値 n_2 から第2の値 n_1 まで360度にわたる方位角と共に単調に（増加しながら又は減少しながら）変化してもよい。

【0015】

屈折率は、第1の値 n_2 から第2の値 n_1 まで360度にわたる方位角と共に線形に（増加しながら又は減少しながら）変化してもよい。

【0016】

導波路は光ファイバでもよい。

【0017】

好ましくは導波路はコアを包囲するクラッド部を更に有する。クラッド部は n_1 及び n_2 よりも小さい屈折率 n_3 を有してもよい。或いはクラッド部は n_1 及び n_2 よりも大きい屈折率 n_3 を有してもよい。不連続部はクラッド部に達してもよいし、クラッド部の手前で止まってもよい。

【0018】

コア内の屈折率変化に起因して、光が導波路の長さ方向に沿って伝搬する場合に、光は左回り又は右回りの螺旋に従って進む。

【0019】

導波路は、コアの中心部に（又は実質的に中心部に）、不連続部が延在していない領域を有してもよい。その領域は円筒形状でもよい。その円筒はコアと同心状でもよい。円筒は導波路と同心状でもよい。その領域は例えば n_1 、 n_2 、 n_3 の屈折率を有してもよい、別の屈折率 n_4 を有してもよい。領域は空洞又はホールでもよい。

【0020】

不連続部は光導波路の長さ方向に沿って一様でもよい。かくて導波路はその長さ方向に沿って一様な断面になってもよい。

【0021】

不連続部は光導波路の長さ方向の全部又は一部に沿って回転していてもよい。

【0022】

光導波路は、 n_2 から n_1 への屈折率変化が第1の偏光性に関連する第1の長さ方向部分（例えば、光が導入される部分の端部を見込む方向に沿って眺めた場合に、時計回りに増える方位角と共に増加し、その観点からは左回りの変化である）と、 n_2 から n_1 への屈折率変化が逆の第2の偏光性に関連する第2の長さ方向部分（例えば、同じ方向から眺めた場合に、時計回りに増える方位角と共に減少し、その観点からは右回りの変化である）とを有してもよい。

【0023】

一組の逆の偏光性の部分を複数組存在してもよい。等しい長さの逆の偏光性の部分が連結され、当該光導波路を形成してもよい。連結された等長部分は異なる光モード間のカップリングを行うように4分の1周期のカップリング長を用意してもよい。

【0024】

光導波路の屈折率は半径方向に変化してもよい。屈折率の変化によりファイバの横断面で同心状のゾーンを形成してもよい。同心状のゾーンはリングでもよい。リングが等しい幅を有し、ゾーンがブラッグゾーンプレート形成してもよい。或いは一連のリングが減少する幅を有し、前記ゾーンがフレネルゾーンプレートを形成してもよい。（フレネルゾーンプレートは周知の光学装置であり、プレートの中心から n 番目のリングの外半径は $r_n = \sqrt{n \cdot r_1}$ で与えられ、 r_1 はプレートの中心領域の外半径である。）

半径方向に沿う複数の不連続部が存在してもよい。半径方向に沿う複数の不連続部が異なる方位角にあってもよい；例えば、不連続部は一連のゾーンの中で増加する半径の地点で X 度だけ変位させてもよく、 X は 180° 、 90° 、 72° 、 60° 、 45° 、 30° の中から選択さ

10

20

30

40

50

れる。ファイバの横断面で同心状のゾーンをもたらし屈折率変化があり、半径方向に沿う不連続部が異なるゾーンにあってもよい。

【0025】

本発明の第2形態によれば、左回り又は右回りのゼロでない軌道角運動量を有する光を伝送する方法がもたらされ、当該方法は本発明の第1形態による光導波路に光を導入し、方位角を増やした場合の屈折率変化は、送信される光の偏光性を有する光の伝搬を支援する。

【0026】

かくて右回りの光が或る屈折率を有するコアの中に導入され、その屈折率は光が伝搬する方向で眺めた場合であって方位角が時計回りに増える場合に減少する。或いは左回りの光が或る屈折率を有するコアの中に導入され、その屈折率は光が伝搬する方向で眺めた場合であって方位角が時計回りに増える場合に増加する。かくて光の軌道角運動量は導波路内を伝搬する間に保存される。

【発明を実施するための最良の形態】

【0027】

以下、本発明の一例に過ぎない実施例が添付図面を参照しながら説明される。

【0028】

本発明の実施例は、従来の半径方向に変化する屈折率パターンとは異なり、方位によって変化するファイバコアのキラリティの屈折率パターンに基づくマイクロストラクチャファイバ(MSF)設計例である。ファイバ(図1)は一樣な屈折率のクラッド10の内側で方位によって変化する局所的な屈折率を備えるコアを有する。方位によって(角度的に)変化する屈折率は或る半径エッジ50に沿う階段状の不連続性を有する。屈折率(RI)は方位角(極角) θ が増えるにつれて半径エッジ50に沿う高屈折率 n_2 から低屈折率 n_1 へ減少する。この特定の実施例では導波路のコア20はより高い屈折率 $n_3(>n_1, n_2)$ の同心状クラッド10内に含まれている。

【0029】

キラリティ屈折率勾配(chiral refractive index gradient)の結果、光はファイバ内に導かれる。適切なOAMの光は、OAMは維持されるが回転半径は減少する対数螺旋状の軌跡(即ち、渦巻き)に従う。それ故に光は方角的に変化する屈折率分布により閉じこめられ、ぎっしり詰まった渦巻き又は螺旋に継続的に「フォーカスされ」(絞り込まれ)、逃れられない。しかしながら逆の偏光性又はキラリティの光はいつか増加する半径の螺旋軌跡に従う。最終的にはその螺旋の半径はコアのものより大きくなり、光はコアから出て行き、外へ放射される。従ってこの逆の偏光性を有する光はファイバによって案内されず、外へ放射される。

【0030】

光はコア20の中で屈折率勾配に従って曲がり、その軌跡はファイバの長さ方向に沿って伝搬する際に或る偏光性の螺旋に従う。半径エッジ50に沿う不連続性は光の伝搬には影響しないが、その不連続性(切れ目)50にわたる方位勾配は一樣であることが仮定される。勾配の付いた屈折率(GRIN: graded index)媒体の中での光軌跡を支配する方程式は、屈折率の変化率に依存する傾向があるので、屈折率の完全な不連続性は光の伝搬性(軌跡)に影響する傾向を有しない。螺旋軌跡の偏光性は屈折率勾配の偏光性によって一意に決定される。従って適切な軌道角運動量の光がファイバの中に発射されるならば、その光を導く機能が発揮される。OAM(及びその偏光性)は伝搬中に保存される。逆の偏光性の光はガイドされず、放出される。

【0031】

ファイバは本質的に固有の偏光性を有し、1つのキラリティの光伝搬しかサポートしない。

【0032】

非限定的な単なる説明により、本発明に関する物理についての我々の考察内容を説明する。我々の分析において本発明によるキラルフайバの光伝搬に関する様々な数値分析が

10

20

30

40

50

なされた。図 3 はファイバ及びその屈折率特性を方位角 θ の関数として示す概略図である。

【0033】

光の伝搬性は最小時間のフェルマーの原理を用いて分析された。これはビーム伝搬モデル分析に比較して少ない演算負担で済む利点を有するだけでなく、本願の装置の導波路特性に更に深い洞察をも与える。方程式 (1) はカーテシアン座標空間 $\underline{x}$ の関数として屈折率分布 $n(\underline{x})$ を有する媒体の中での光線の軌跡 s を記述し、その方程式は分析の便宜を図るため円筒座標 (r, θ, z) に変換される。

【0034】

【数 1】

10

$$\frac{d}{ds} \left(n(\underline{x}) \frac{d\underline{x}}{ds} \right) = \nabla n(\underline{x}) \quad (1)$$

円筒座標では方程式 (1) は次のように書ける：

【0035】

【数 2】

20

$$\left\{ \frac{d}{ds} \left(n \frac{dr}{ds} \right) - nr \left(\frac{d\theta}{ds} \right)^2 \right\} \hat{r} + \left\{ n \frac{dr}{ds} \frac{d\theta}{ds} + \frac{d}{ds} \left(nr \frac{d\theta}{ds} \right) \right\} \hat{\theta} + \left\{ \frac{d}{ds} \left[n \left(\frac{dz}{ds} \right) \right] \right\} \hat{z} = \frac{dn}{dr} \hat{r} + \frac{1}{r} \frac{dn}{d\theta} \hat{\theta} + \frac{dn}{dz} \hat{z} \quad (2)$$

我々が関心を寄せる方位 GRIN 幾何学に関し、次のことを仮定することができる。

【0036】

30

【数 3】

$$\frac{dn}{dr} = \frac{dn}{dz} = 0$$

更に、光は近似的に螺旋軌道でファイバに沿って伝搬するものとする。螺旋軌道は円筒表面上にあり、螺旋が「展開 (unwrapped)」されるならば、図 4 (a) に示されるように、直角三角形を形成する。半径 r 、 z 軸方向 (即ち、伝搬方向) の長さ (即ち、ピッチ) H の螺旋の一巻きに関し、軌跡 s の長さは $s^2 = H^2 + (2\pi r)^2$ で簡潔に与えられる。

【0037】

更に螺旋は角度 γ で次のように特徴づけられる。

【0038】

40

【数 4】

$$\cos \gamma = \frac{H}{s} = \frac{dz}{ds}$$

螺旋のこの性質を利用して、演算子（オペレータ）の関係を、

【0 0 3 9】

10

【数 5】

$$\frac{d}{ds} = \cos \gamma \frac{d}{dz} \quad (3)$$

のように定義することができる。

20

【0 0 4 0】

【数 6】

$$n\dot{\theta}r^2$$

のような量（但し、 θ ドットは $d\theta/dz$ である）は軌跡の OAM に比例し：

【0 0 4 1】

30

【数 7】

$$L = \hbar k \dot{\theta} r^2 = l \hbar \quad (4)$$

従って、これは運動に関して保存され且つ一定であることに留意を要する。ここで、 k は光の伝搬定数である。OAM は $\hbar$ バーの整数倍（1 倍）であることにも留意を要する。一定の半径の螺旋軌跡を単に仮定するのではなく、対数螺旋（即ち、近似的な螺旋軌跡であるが、半径が変化する螺旋）を考察することで微分方程式（2）に対する一層起こり得る軌跡の解を探ることができる。対数螺旋は $dr = -\beta n r d\theta$ の表式で記述され、半径 r は方位角 θ と共に変化し、 β は比例定数であり、上記の完全な螺旋の場合にはゼロに等しい。オペレータ（3）を対数螺旋に関する方程式に適用することで、次式が得られる：

40

【0 0 4 2】

【数 8】

$$\frac{dr}{ds} = -\beta n r \dot{\theta} \cos \gamma = \text{constant} \quad (5)$$

(2) の半径方向を考察すると、方位性の GRIN ファイバに関し、
【0 0 4 3】

10

【数 9】

$$\frac{d}{ds} \left(n \frac{dr}{ds} \right) - n r \left(\frac{d\theta}{ds} \right)^2 = 0 \quad (6)$$

のように書くことができる。

20

【0 0 4 4】

【数 1 0】

$$\frac{dn}{ds} = \frac{dn}{d\theta} \frac{d\theta}{ds}$$

であり、必要に応じて恒等式 (3) を使用すること、及び (5) 式は

30

【0 0 4 5】

【数 1 1】

$$\frac{d^2 r}{ds^2} = 0$$

を示し、方程式 (6) は $dn(\theta) = -d\theta / \beta$ を与えるように変形できることに留意を要し、総合すると方位屈折率変化は比例関係 $n(\theta) = n_2 - \theta / \beta$ を満たす必要があり、これは螺旋位相面に関するものと同じである。(2) の方位方向を考察すると、

40

【0 0 4 6】

【数 1 2】

$$n \frac{dr}{ds} \frac{d\theta}{ds} + \frac{d}{ds} \left(n r \frac{d\theta}{ds} \right) = \frac{l}{r} \frac{dn}{d\theta} \quad (7)$$

が得られる。

50

【0047】

偏光性の保存に関し、我々はファイバの長さZに沿う螺旋軌跡に1つの完全な回転しか要求しない、即ちキラルガイディングを弱めることができる。これは不連続性を表す屈折率変化がファイバの長さを任意に増やす場合にゼロに近づき得ることを意味する、即ち、

【0048】

【数13】

$$dn/n \rightarrow 0 \mid \lim_{z \rightarrow \infty}$$

10

である。これは満たされる方程式(7)と矛盾しないよう要求される。

【0049】

方程式(5)を考察するに、 β は与えられた方位GRINファイバに関して及び与えられた光のOAM- $n(\theta \text{ ドット})r^2$ に関して一定であるので、螺旋の角度 γ は定数及び半径 r によって決定される。方程式(5)は、方位GRIN変化 $n(\theta)=n_2 - \theta / \beta$ に関して及び正の(即ち、右回りの)OAMに関して($\theta \text{ ドット}$ の符号で決められる)、軌跡の半径が減少傾向にあることを示す。これに対して、左回りの(反時計回りの)OAMは、軌跡がファイバの半径を超えるまで軌跡の半径を徐々に増やし、その光は放出されることになる。従って左回りの光はこの方位性ファイバによっては案内されず、放出される。

20

【0050】

右回りの光について、ファイバ内に残る光に関して半径は減少し、従ってそれはガイドされる。しかしながら不確定性原理により光は有限の最小値までしか減少できない。螺旋軌道に関し、角速度は $\theta \text{ ドット}=2\pi/H$ で与えられ、ここで H は螺旋のピッチである。OAMは一定であるので、従って最小半径は

【0051】

【数14】

$$r_0 = \frac{l}{2\pi} \sqrt{\frac{\lambda H}{n(\theta)}}$$

30

で与えられ、ここで $l=1$ であり(方程式4参照)、 λ は光の波長である。理解できるように、螺旋半径は方位屈折率に依存する。従って屈折率の不連続点では、OAMが保存されるためには図4(b)に示されるように螺旋半径は動経方向に変位しなければならない。これは光ホール効果(optical Hall effect)と同様に考えることができる。安定的な軌跡はファイバ回りの各ループに関して 2π の位相増加を要し、即ち一回りの各々についての軌跡の長さは波長の整数倍でなければならない。図4(a)を参照するに、これは螺旋一巻きの軌跡の長さが

40

【0052】

【数15】

$$s = \sqrt{H^2 + (2\pi r_0)^2} = N\lambda$$

でなければならないことを意味し、ここで N は整数である。

50

【0053】

以前に算出した最小半径の表式をこれに代入し、正の解だけを考察すると、螺旋ピッチは

【0054】

【数16】

$$H = \frac{\lambda}{2n} \left\{ \sqrt{1 + 4n^2 N^2} - 1 \right\} \quad (8)$$

10

で与えられることを要する。

【0055】

螺旋ピッチが従来の1次ブラッグ分布回折格子の周期に比例することは興味深い。

【0056】

図1(a)のファイバの逆の偏光性を有するキラル対応物は図1(b)に示される。

【0057】

ファイバジオメトリの中心での位相特異性はそこにゼロ振幅の光が存在することを含む（即ち、有限振幅の光はファイバの中心に存在することができないような特異性がそこにある。）。本発明の一実施例では、屈折率 n_4 の材料（或いは等価的に他の屈折率 n_1, n_2, n_3 のどれでもよい）又は中空コアファイバのような単なる空気（又は真空）より成る一様な屈折率の領域（例えば、ファイバの長さに沿う同心円等領域）が存在する。そのようなファイバの具体例は図2に示されている。再びファイバは一様な屈折率のクラディング10の内側で方位によって変化する屈折率を有するコア25、35を有するが、目下の場合ファイバの中心に付加的な一様な屈折率の領域40が備わっている。図2(b)は図2(a)のファイバの逆の偏光性を有する対応物を示す。

20

【0058】

ファイバはキラル特性を有するが、それ自身よじれた幾何学形状を有することは必要ではなく、即ちファイバ軸に沿って伸びる場合に半径方向の不連続線は平面を形成するように真っ直ぐに残ることに留意を要する。図1、2の双方は0AM保存ファイバの断面図を示す。ファイバの長さ全体にわたって同一の断面図が一様に続くことを仮定することができる。

30

【0059】

しかしながら別の実施例では（図示せず）、半径方向の不連続線がファイバ軸に沿ってねじれており、その断面はファイバの長さに沿う所定のピッチ（又はチャープ若しくは不規則なピッチ）で（時計回りに又は反時計回りに）回転する。そのよじれ（ツイスト）は屈折率勾配に対して逆である。

【0060】

別の実施例では左回りの及び右回りの0AM保存ファイバ（振られた又は振られていない）の等しい長さの部分が連結され、導波路全体を構成し、更なる新たな機能を発揮する。この変形例では、（例えば、ブラッグ位相整合や伝搬モード整合等のように）等しい長さの部分は結合長の4分の1に等価であるように設定され、（同一の偏光性であるが1とは異なる整数値であるもの或いは2つの逆の偏光モード間のような）異なる0AMモード間のカップリングをもたらす。

40

【0061】

図5に示される例では、方位屈折率変化自身が半径方向に変化し、同心リング110、120を形成する。第1群のリング110では、方向性変化が第1の不連続部150（それ自身ファイバの半径に沿って不連続である）で始まり及び終了する。第2群のリング120では、半径方向に増えた所で第1群のリング110とリングが置き換わり、方位変化が第2の（断片的な）不連続部160で始まり及び終了し、第1の不連続部150から1

50

80度方角的に異なる。第1群のリング110内の方位変化は、第2群のリング120内の方位変化に対して逆の偏光性でもある。

【0062】

リング110, 120の半径は、リング110, 120が共にフレネルゾーンプレートのパターンを形成するように決定される。フレネルゾーンプレートは周知の光学装置であり、一種のレンズとして機能し、そのプレートを通過する光を絞り込む。図5の実施例のフレネル構造はそれ自身ファイバ内に光を案内するように機能することができ；屈折率の方向性変化はその案内機能を支援することができる。しかしながら変形例の偏光性は異なる半径で異なるので、別の効果が得られる。例えばファイバの中を伝搬する光の高次の横波モードは低次の横波モードよりも横断面で大きくなる傾向がある。従って図5のファイバを伝搬する異なるモードは異なるリング110, 120に影響し；屈折率変化の偏光性は隣接するリング110, 120で逆なので、同じOAMのモードは、リング110, 120の正味の効果が影響を及ぼす領域に依存して異なる損失の影響を受け、その正味の影響はファイバからそれらを排出する或いはファイバにそれらを閉じこめる傾向を有する。かくてファイバは1つのモードフィルタとして機能してよい。

10

【0063】

図6の例のファイバもフレネルゾーンプレートのパターンを形成する環状リング210, 220を有する。図5と同様に各リング210, 220の屈折率の不連続部250, 260は隣接するものと180度だけずらされているが；この例では方向性変化は各リング210, 220で同じ偏光性に属する。

20

【0064】

図7, 8の例のファイバもフレネルゾーンプレートのパターンを形成するリングを有する。図6と同様に屈折率変化は各リングで同じ偏光性に属する。図7では中心から半径方向に外に向かう一連のリングの屈折率の不連続部310, 320, 330, 340はこの例では90度だけずらされている。図8では一連のリングの屈折率の不連続部410, 420, 430, 440は45度だけずらされている。

【0065】

実施例で説明された本発明による導波路の「偏光性」依存性は物理層データキーのような重要な新たな暗号化技術の用途を見出すかもしれない。更に本願のファイバは光ピンセットのような状況でOAM光をフレキシブルに案内する手段をもたらしすることができる。

30

【0066】

以下、本発明により教示される手段が例示的に列举される。

【0067】

(付記1)

コアを有する光導波路であって、前記コアは半径方向に沿う不連続部を有する屈折率を有し、該屈折率は方位角 θ が増えるにつれて前記不連続部の第1側面での第1の値 n_2 から前記不連続部の第2側面での第2の値 n_1 に変化する

ことを特徴とする光導波路。

【0068】

(付記2)

前記屈折率は、前記第1の値 n_2 から前記第2の値 n_1 まで360度にわたる方位角と共に単調に変化する

ことを特徴とする付記1記載の光導波路。

40

【0069】

(付記3)

前記屈折率は、前記第1の値 n_2 から前記第2の値 n_1 まで360度にわたる方位角と共に線形に変化する

ことを特徴とする付記2記載の光導波路。

【0070】

(付記4)

50

前記コアの中心部に（又は実質的に中心部に）、前記不連続部が延在していない領域を有する

ことを特徴とする付記 1 乃至 3 の何れか 1 項に記載の光導波路。

【0071】

（付記 5）

前記不連続部が、当該光導波路の長さ方向に沿って一様である

ことを特徴とする付記 1 乃至 4 の何れか 1 項に記載の光導波路。

【0072】

（付記 6）

前記不連続部が、当該光導波路の長さ方向の全部又は一部に沿って回転している

ことを特徴とする付記 1 乃至 4 の何れか 1 項に記載の光導波路。

10

【0073】

（付記 7）

当該光導波路が、 n_2 から n_1 への屈折率変化が第 1 の偏光性に関連する第 1 の長さ方向部分と、 n_2 から n_1 への屈折率変化が逆の第 2 の偏光性に関連する第 2 の長さ方向部分とを有する

ことを特徴とする付記 1 乃至 4 の何れか 1 項に記載の光導波路。

【0074】

（付記 8）

一組の逆の偏光性の部分を複数組有する

ことを特徴とする付記 7 記載の光導波路。

20

【0075】

（付記 9）

等しい長さの逆の偏光性の部分が連結され、当該光導波路を形成する

ことを特徴とする付記 8 記載の光導波路。

【0076】

（付記 10）

当該光導波路の屈折率が半径方向に変化する

ことを特徴とする付記 1 乃至 9 の何れか 1 項に記載の光導波路。

【0077】

（付記 11）

屈折率の変化によりファイバの横断面で同心状のゾーンを形成する

ことを特徴とする付記 10 記載の光導波路。

30

【0078】

（付記 12）

前記同心状のゾーンがリングである

ことを特徴とする付記 11 記載の光導波路。

【0079】

（付記 13）

前記リングが等しい幅を有し、ブラッグゾーンプレートを形成する

ことを特徴とする付記 12 記載の光導波路。

40

【0080】

（付記 14）

一連のリングが減少する幅を有し、前記ゾーンがフレネルゾーンプレートを形成する

ことを特徴とする付記 12 記載の光導波路。

【0081】

（付記 15）

半径方向に沿う複数の不連続部を有する

ことを特徴とする付記 1 乃至 4 の何れか 1 項に記載の光導波路。

【0082】

50

(付記 1 6)

半径方向に沿う複数の不連続部が異なる方位角にある
ことを特徴とする付記 1 5 記載の光導波路。

【0083】

(付記 1 7)

ファイバの横断面で同心状のゾーンをもたらす屈折率変化があり、半径方向に沿う不連続部が異なるゾーンにある

ことを特徴とする付記 1 5 又は 1 6 に記載の光導波路。

【0084】

(付記 1 8)

左回り又は右回りのゼロでない軌道角運動量を有する光を伝送する方法であって、付記 1 乃至 1 6 の何れか 1 項に記載の光導波路に光を導入し、方位角を増やした場合の屈折率変化は、送信される光の偏光性を有する光の伝搬を支援する

ことを特徴とする方法。

【図面の簡単な説明】

【0085】

【図 1】本発明による 2 つの導波路の概略断面図である ((a), (b) のファイバは逆の偏光性を有する)。

【図 2】本発明による別の 2 つの導波路の概略断面図である ((a), (b) のファイバは逆の偏光性を有する)。

【図 3】光の軌跡を描いたキラル方位 GRIN ファイバの概略図 (a) 及びその屈折率特性 (b) を示す図である。

【図 4】「展開された」螺旋の直角三角形 (a) 及び最小半径対数螺旋 (準螺旋) の軌跡 (b) を示す図である (屈折率の不連続点で半径がシフトする様子を示す)。

【図 5】本発明による他の導波路の概略断面図である。

【図 6】本発明による他の導波路の概略断面図である。

【図 7】本発明による他の導波路の概略断面図である。

【図 8】本発明による他の導波路の概略断面図である。

【符号の説明】

【0086】

1 0 クラッピング

2 0, 3 0, 2 5, 3 5 コア

5 0, 5 5, 6 0, 6 5 不連続部

4 0 同心状領域

1 1 0, 1 2 0, 2 1 0, 2 2 0 リング

1 5 0, 1 6 0, 2 5 0, 2 6 0 不連続部

3 1 0, 3 2 0, 3 3 0, 3 4 0 不連続部

4 1 0, 4 2 0, 4 3 0, 4 4 0 不連続部

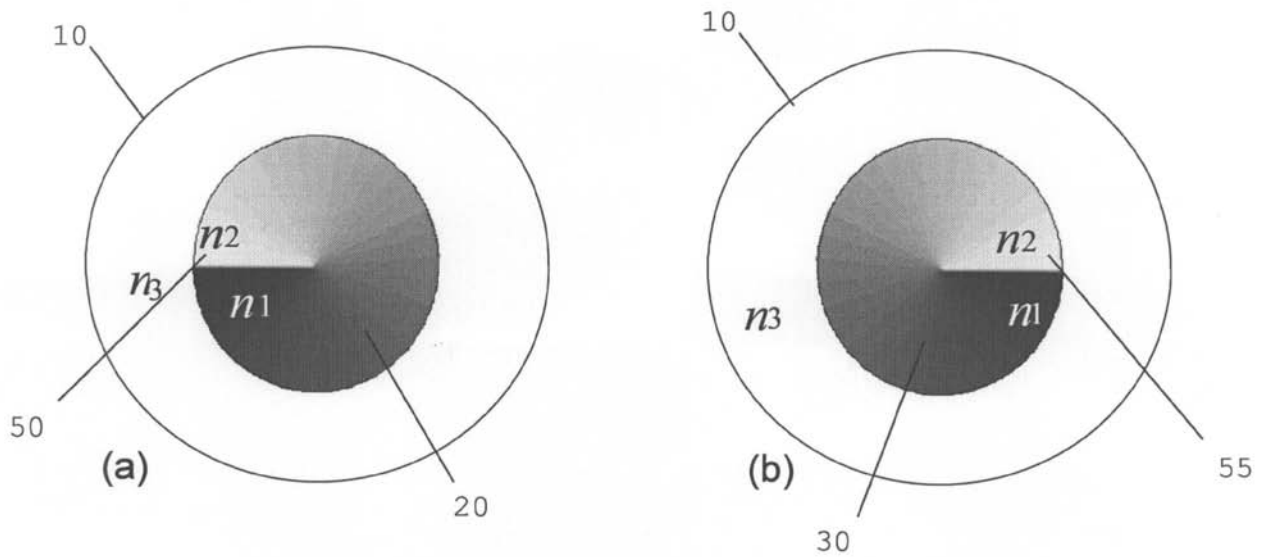
10

20

30

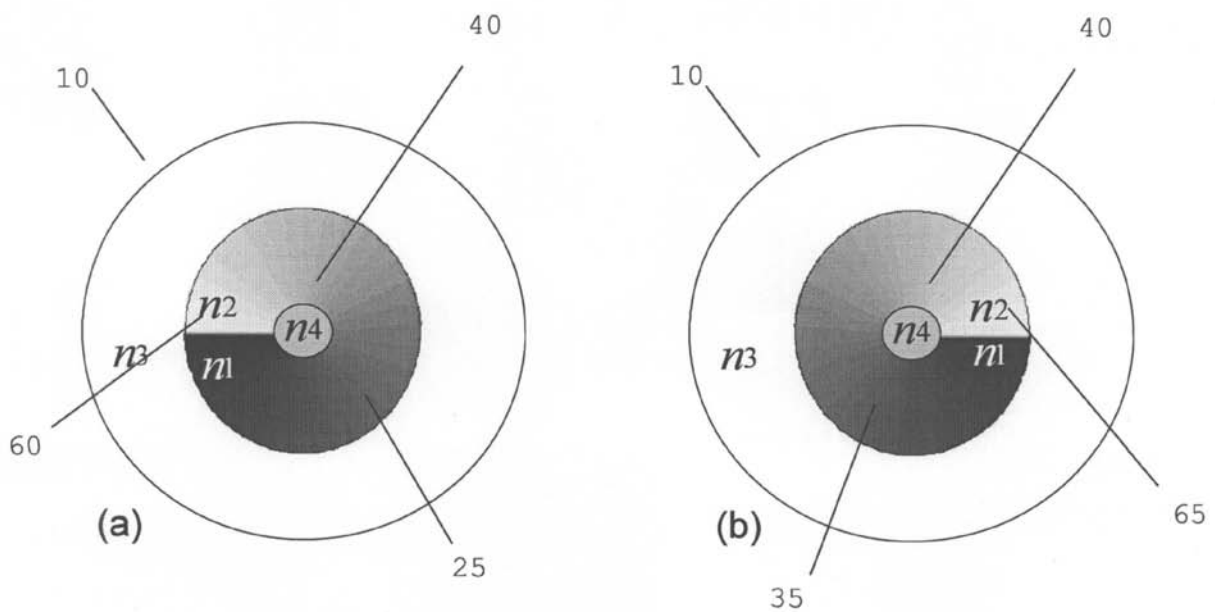
【図 1】

本発明による 2 つの導波路の概略断面図 ((a), (b) のファイバは逆の偏光性を有する)



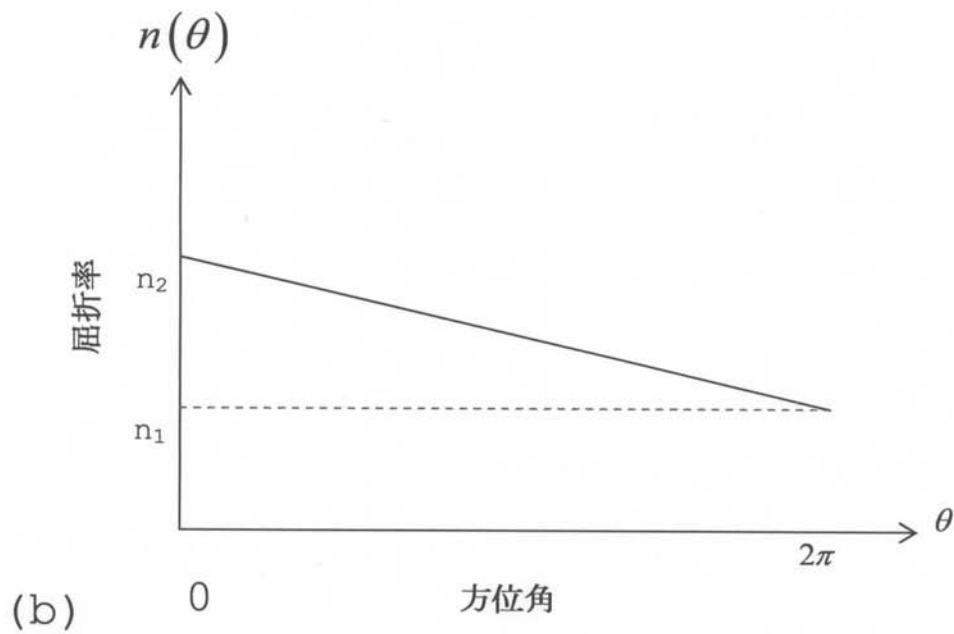
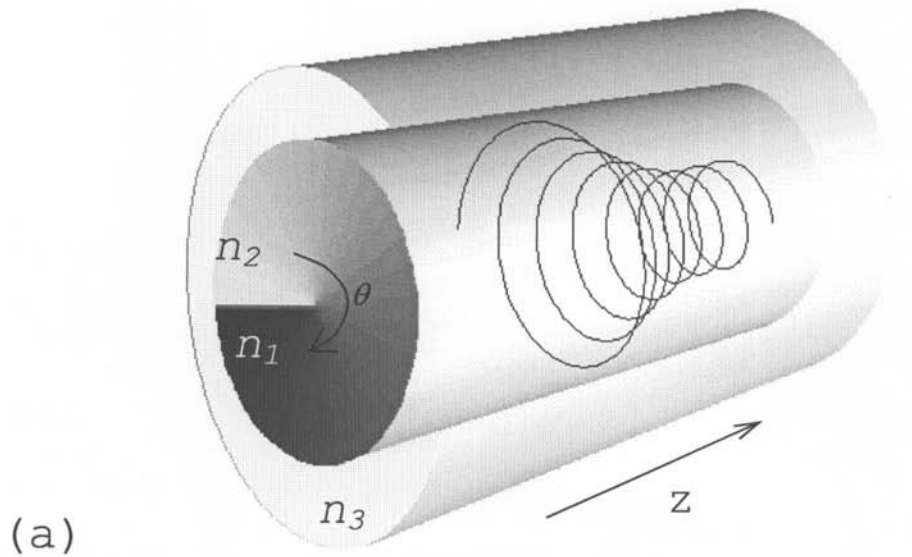
【図 2】

本発明による別の 2 つの導波路の概略断面図 ((a), (b) のファイバは逆の偏光性を有する)



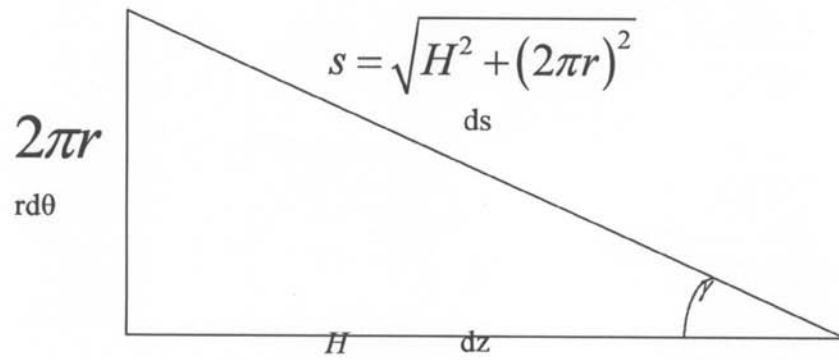
【図 3】

光の軌跡を描いたキラル方位 GRIN ファイバの概略図 (a) 及びその屈折率特性 (b) を示す図

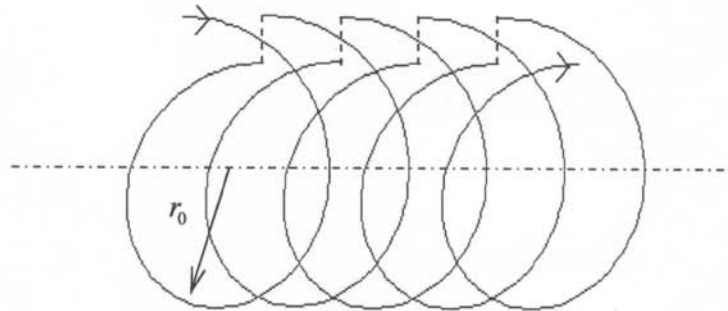


【図 4】

「展開された」螺旋の直角三角形 (a) 及び最小半径対数螺旋（準螺旋）の軌跡 (b) を示す図である（屈折率の不連続点で半径がシフトする様子を示す）



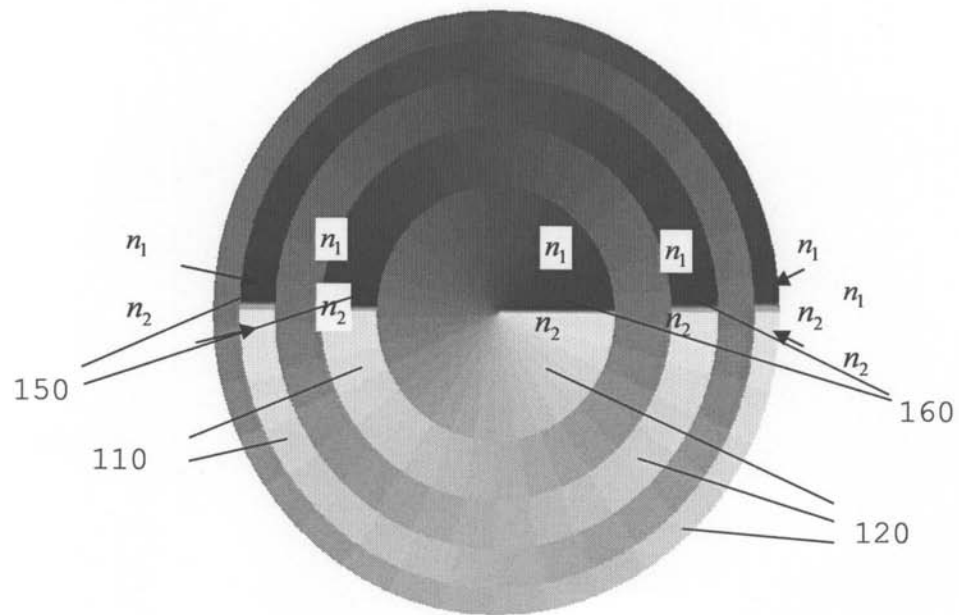
(a)



(b)

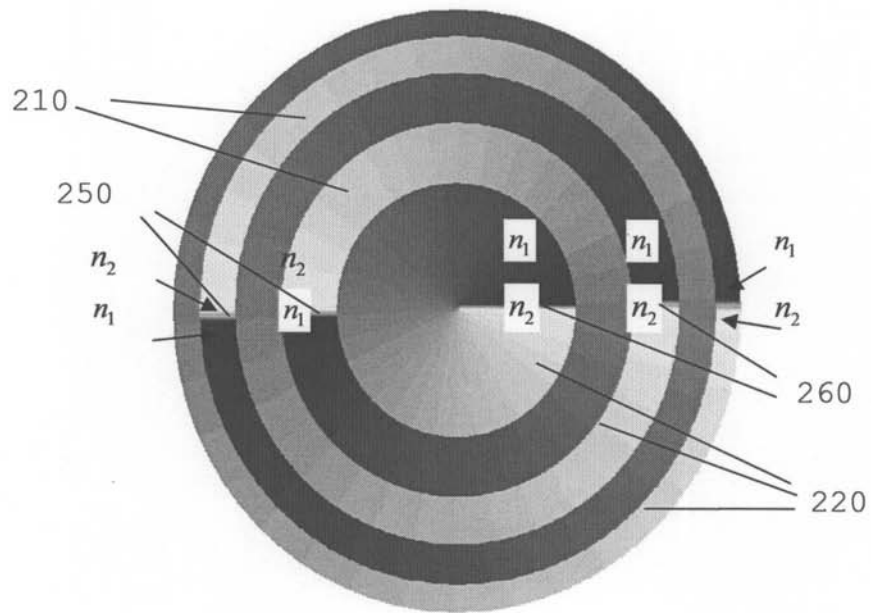
【図 5】

本発明による他の導波路の概略断面図



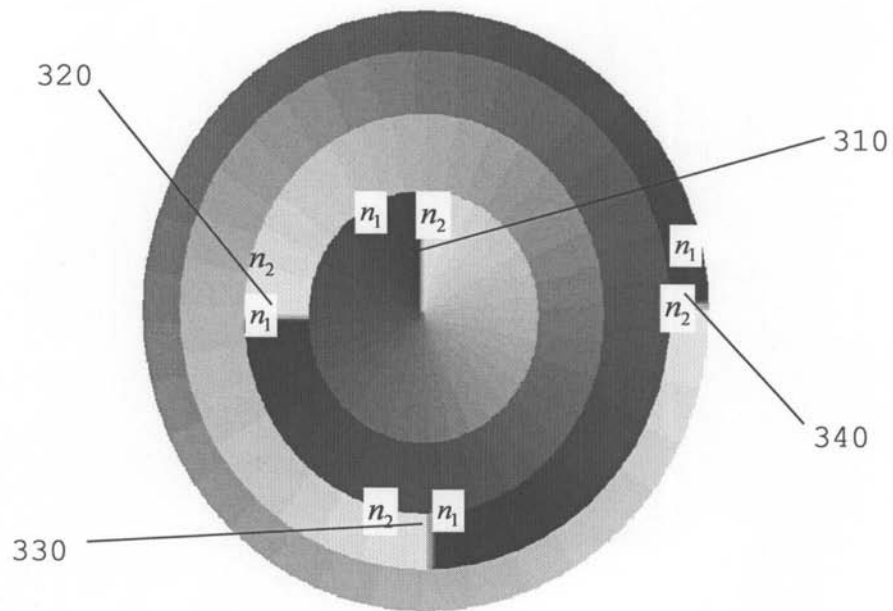
【図 6】

本発明による他の導波路の概略断面図



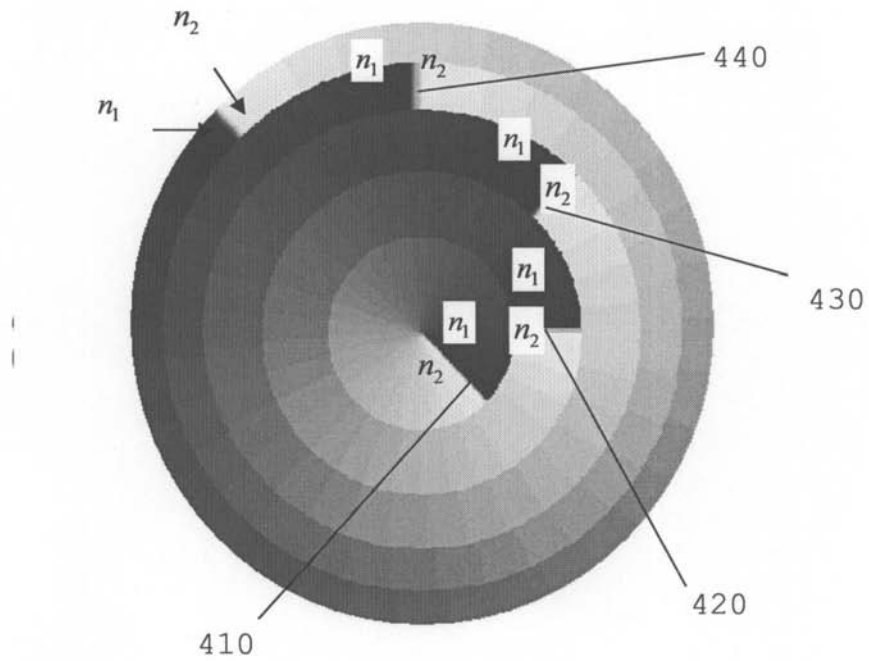
【図 7】

本発明による他の導波路の概略断面図



【図 8】

本発明による他の導波路の概略断面図



フロントページの続き

(72)発明者 スチュアート ダグラス ウォーカー
イギリス国, エセックス シーオー3 0ジェイティー, コールチェスター, スタンウェイ, ハル
ステッド ロード 183番
Fターム(参考) 2H050 AC01 AC02 AC73