

A1

**DEMANDE
DE BREVET D'INVENTION**

(21)

N° 81 19162

(54) Procédé et dispositif de mesure du diamètre effectif du mode guidé dans une fibre optique monomode.

(51) Classification internationale (Int. Cl.³). G 01 B 11/08; G 01 M 11/02 // G 02 B 5/16.

(22) Date de dépôt..... 12 octobre 1981.

(33) (32) (31) Priorité revendiquée :

(41) Date de la mise à la disposition du
public de la demande..... B.O.P.I. — « Listes » n° 15 du 15-4-1983.

(71) Déposant : ALARD Francis et JEUNHOMME Luc. — FR.

(72) Invention de : Francis Alard et Luc Jeunhomme.

(73) Titulaire : *Idem* (71)

(74) Mandataire : Brevatome,
25, rue de Ponthieu, 75008 Paris.

La présente invention concerne un procédé et un dispositif de mesure du diamètre effectif du mode guidé dans une fibre optique monomode. Elle s'applique notamment à la détermination de caractéristiques des fibres optiques monomodes et donc aux télécommunications optiques.

On sait en effet que ledit diamètre effectif, noté $2w_0$, régit les pertes résultant de microcourbures et de connexions, pour les fibres optiques monomodes, et que la connaissance de ce diamètre effectif en fonction de la longueur d'onde, permet, pour une fibre optique monomode, de déterminer le diamètre de coeur et la différence d'indices optiques de la fibre à échelon (ou saut) d'indice équivalente et donc les pertes par courbure et la bande passante de ladite fibre monomode.

On connaît des méthodes de mesure du profil d'indice ou du diagramme de rayonnement en champ lointain qui permettent de calculer les paramètres de la fibre à échelon d'indice équivalente à une fibre optique monomode et d'en déduire le diamètre effectif $2w_0$ de cette dernière.

Les méthodes de mesure du profil d'indice sont très difficiles à mettre en oeuvre à cause du très petit diamètre du coeur d'une fibre optique monomode qui, en général, est inférieur à 10 μm . En outre, les paramètres de la fibre équivalente sont alors obtenus indirectement par un calcul et la valeur du diamètre effectif $2w_0$, elle-même obtenue par un nouveau calcul, est très peu précise.

Les méthodes de mesure du diagramme de rayonnement en champ lointain nécessitent, quant à elles, des sources lumineuses très brillantes car elles impliquent la mesure de lobes secondaires qui ont une intensité relative très faible. Les sources utilisables sont les lasers du type à krypton, à argon, à hélium-néon ou à YAG-Nd³⁺ et imposent donc à la fibre étudiée d'être monomode à leur longueur d'onde d'émission, qui va de 0,5 à 0,8 μm pour les premiers et qui vaut 1,06 μm pour le

laser à YAG-Nd³⁺, ce qui n'est pas forcément le cas.

Les méthodes précédemment mentionnées ne permettent qu'une détermination indirecte du diamètre effectif $2w_0$. Une méthode de mesure directe de ce dernier est donnée dans un article de C.A. MILLAR, publié dans la revue Electronics Letters, vol. 17, n° 13, juin 1981 - pp. 458-460, mais cette méthode nécessite un banc de mesure spécial pour sa mise en oeuvre, ce qui impose donc une manipulation supplémentaire de la fibre étudiée par rapport aux autres mesures que l'on désire effectuer sur elle. Cela est d'ailleurs également vrai pour les autres méthodes de détermination indirecte mentionnées ci-dessus.

La présente invention a pour objet un procédé et un dispositif de mesure du diamètre effectif du mode guidé dans une fibre optique monomode, qui ne présentent pas les inconvénients des méthodes précédentes, notamment en ce qu'ils permettent de mesurer directement ledit diamètre effectif et d'effectuer la mesure de celui-ci sur un montage identique à celui qui est utilisé pour les mesures d'atténuation, évitant ainsi une manipulation supplémentaire, longue et coûteuse, de la fibre étudiée.

De façon précise, la présente invention a pour objet un procédé de mesure du diamètre effectif $2w_0$ du mode guidé dans une fibre optique monomode, à une longueur d'onde λ , ladite fibre optique admettant une face d'entrée, caractérisé en ce qu'il consiste :

- à diriger sur ladite face d'entrée un faisceau de lumière incohérente de longueur d'onde λ , incident sur ladite face d'entrée selon un cône de demi-angle au sommet ϕ , ledit faisceau ayant une section droite sur la face d'entrée, supérieure à celle du coeur de la fibre optique, ayant une intensité qui présente une symétrie de révolution autour de l'axe dudit cône et étant tel que la puissance lumineuse transportée par ce faisceau dans un angle

solide infiniment petit $d\Omega$ autour d'une direction faisant un angle θ avec ledit axe soit proportionnelle à $\cos \theta d\Omega$, la fibre optique étant disposée selon cet axe,

- 5 - à mesurer la puissance lumineuse $P(\phi)$ transmise par cette fibre optique, en fonction du demi-angle au sommet ϕ , et
- à déterminer le diamètre effectif $2w_0$ à l'aide de la formule suivante, dans laquelle P_∞ est
- 10 une quantité indépendante du demi-angle au sommet ϕ :

$$P(\phi) = P_\infty \left[1 - \exp \left(-2(\pi^2 w_0^2 / \lambda^2) \sin^2 \phi \right) \right]$$

15 Selon une caractéristique particulière du procédé objet de l'invention, ledit faisceau lumineux est obtenu à l'aide d'une source de rayonnement incohérent de longueur d'onde λ , dont on forme l'image sur ladite face d'entrée, grâce à des moyens optiques , l'image de la source ayant une

20 taille supérieure au diamètre de coeur de la fibre optique , ladite source admettant un diagramme de rayonnement qui présente une symétrie de révolution autour d'un axe formant l'axe dudit cône et étant telle que la puissance lumineuse émise par

25 elle dans un angle solide infiniment petit $d\Omega_s$ autour d'une direction faisant un angle θ_s avec ledit axe soit proportionnelle à $\cos \theta_s d\Omega_s$, lesdits moyens optiques conservant la loi angulaire du rayonnement et permettant de faire varier le demi-angle au sommet ϕ .

30 Selon une autre caractéristique particulière, la source comprend une lampe quartz-halogène à filament de tungstène, munie de moyens de sélection de longueur d'onde, de façon à obtenir le rayonnement de longueur d'onde λ .

Selon une autre caractéristique particulière, les moyens optiques consistent en un objectif à ouverture variable. On peut alors faire varier le demi-angle au sommet ϕ à l'aide de ladite ouverture variable, de façon à obtenir plusieurs couples (ϕ , $P(\phi)$), et déterminer, à l'aide desdits couples et de ladite formule, le diamètre effectif $2w_0$ par la méthode des moindres carrés.

Selon une autre caractéristique particulière, la taille de l'image de la source est au moins cinq fois plus grande que le diamètre de coeur de la fibre optique.

L'invention a également pour objet un dispositif de mesure du diamètre effectif $2w_0$ du mode guidé dans une fibre optique monomode, à une longueur d'onde λ , caractérisé en ce qu'il comprend, dans l'ordre, ladite source, lesdits moyens optiques et des moyens de mesure de ladite puissance lumineuse $P(\phi)$

transmise par la fibre optique, celle-ci étant interposée entre les moyens optiques et les moyens de mesure.

L'invention permet bien entendu de déterminer ledit diamètre effectif $2w_0$ du mode guidé à différentes longueurs d'onde, en réalisant une mesure de w_0 à chacune de ces longueurs d'onde. On peut alors, comme indiqué plus haut, déterminer le diamètre de coeur et la différence des indices optiques de la fibre à saut d'indice équivalente. Toute longueur d'onde à laquelle on effectue une mesure du diamètre effectif doit, bien entendu, être supérieure à la longueur d'onde de coupure du deuxième mode.

L'invention sera mieux comprise à la lecture de la description qui suit d'un mode de réalisation particulier donné à titre indicatif et non limitatif, en référence aux dessins annexés sur lesquels :

- la figure 1 est une vue schématique d'un mode de réalisation particulier d'un dispositif pour la mise en oeuvre du procédé objet de l'invention ;

5 - la figure 2 est une vue schématique d'un faisceau lumineux émis par une source lumineuse utilisée dans le dispositif représenté sur la figure 1, et

10 - la figure 3 est une vue schématique d'un faisceau lumineux incident sur une fibre optique monomode que l'on désire étudier à l'aide du dispositif de la figure 1.

Sur la figure 1, on a représenté schématiquement un mode de réalisation particulier du dispositif de l'invention, prévu pour déterminer le diamètre effectif $2 w_0$ du mode guidé dans une fibre optique 2 monomode, à une longueur d'onde λ . Ce dispositif comprend essentiellement une source 3 de rayonnement incohérent de longueur d'onde λ , des moyens optiques 4 et des moyens 5 de mesure de puissance lumineuse.

Si la source 3 émet un rayonnement ayant une 20 largeur spectrale supérieure à 5% de la longueur d'onde centrale d'émission, il est préférable de lui adjoindre des moyens 6 de sélection de longueur d'onde, de façon à obtenir le rayonnement de longueur d'onde λ souhaité. Par ailleurs, la source 3 est prévue pour avoir un 25 diagramme de rayonnement qui présente une symétrie de révolution autour d'un axe 7 et cette source 3 est également prévue pour que la puissance lumineuse émise par elle dans un angle solide infiniment petit $d\Omega_s$ (figure 2) autour d'une direction 8 faisant l'angle θ_s 30 avec ledit axe 7 soit proportionnelle à $\cos \theta_s d\Omega_s$ pour tout angle θ_s au plus égal à un angle θ_0 lui-même au plus égal à 90° .

Ainsi peut-on réaliser la source 3 à l'aide d'une lampe 9 quartz-halogène à filament de tungstène 35 associée auxdits moyens 6 de sélection pouvant consister en un monochromateur (ou un filtre de longueur d'onde). La lampe 9 envoie la lumière qu'elle émet sur le monochromateur

6 par l'intermédiaire d'une optique 10. L'axe 7 de révolution est normal à la surface émettrice de la lampe 9. Le monochromateur 6 a par exemple une ouverture de l'ordre de $f/3$ à $f/4$.

- 5 Les moyens optiques 4 sont prévus pour former l'image de la source 3 sur la face d'entrée 11 de la fibre optique 2 et sont choisis pour conserver la loi angulaire du rayonnement de la source 3 à un facteur K près, c'est-à-dire transformer un rayon lumineux incident sous un angle θ_s par rapport à l'axe 7 en un rayon lumineux faisant un angle $\theta = K\theta_s$ par rapport à cet axe 7. Les moyens optiques 4 sont également choisis pour permettre de faire varier, entre les valeurs 0 et θ_M , le demi-angle au sommet ϕ d'un cône 12 de révolution.
- 10 15 ayant pour axe l'axe 7 et formé par ledit rayonnement lorsqu'il tombe sur la face d'entrée 11 de la fibre optique 2, θ_M étant au plus égal à $K\theta_0$.

- Les moyens optiques 4 consistent par exemple en un objectif à ouverture variable, cette ouverture
- 20 pouvant par exemple varier entre $f/1$ à $f/22$. Les variations de cette ouverture entraînent celles du demi-angle au sommet ϕ . L'objectif 4 est par exemple du type de ceux que l'on rencontre dans les appareils photographiques ou les caméras. Ledit facteur K est le facteur
- 25 de grandissement de l'objectif 4.

- La fibre optique 2 est disposée selon ledit axe 7 de révolution et interposée entre l'objectif 4 et les moyens 5 de mesure prévus pour mesurer la puissance lumineuse $P(\phi)$ transmise par la fibre optique 2 lorsque
- 30 celle-ci est éclairée par la source 3. Ces moyens 5 de mesure comprennent par exemple un détecteur au germanium refroidi ou une photodiode.

- La source 3 et l'objectif 4 sont disposés de façon que l'image de la source 3 sur la face d'entrée 11
- 35 de la fibre optique 2 ait une taille beaucoup plus grande (par exemple cinq fois) que le diamètre du coeur 13 de

la fibre optique 2 (figure 3) ou, en d'autres termes, de façon que le faisceau lumineux provenant de la source 3 et tombant sur la face d'entrée 11 de la fibre optique 2 ait une section droite A, sur ladite face d'entrée 11, très supérieure à celle du coeur 13.

Les hypothèses faites plus haut sur les propriétés de la source 3, quant à son diagramme de rayonnement et la puissance lumineuse qu'elle émet, résultent de propriétés identiques de la lampe 9 quartz-halogène et impliquent également des propriétés analogues pour le faisceau lumineux tombant sur la face d'entrée 11 de la fibre optique 2, du fait des propriétés des moyens optiques 4 mentionnées plus haut : l'intensité dudit faisceau présente une symétrie de révolution d'axe ledit axe 7 (axe du cône 12 de demi-angle au sommet ϕ) et ce faisceau est tel que la puissance lumineuse qu'il transporte dans un angle solide infiniment petit $d\Omega$ (figure 3) autour d'une direction 14 faisant un angle θ avec ledit axe 7 soit proportionnelle à $\cos \theta d\Omega$.

La figure 3 permet de préciser ce qu'on entend par angle solide $d\Omega$: il s'agit de l'angle solide correspondant au volume compris entre deux cônes de révolution 15 et 16 ayant pour axe l'axe 7 et de demi-angles au sommet respectifs θ et $\theta + d\theta$. L'angle solide $d\Omega_s$ (figure 2) se définit de façon analogue.

Selon le procédé de l'invention, une fois la longueur d'onde λ de mesure choisie, on mesure la puissance lumineuse $P(\phi)$ transmise par la fibre optique 2, en fonction du demi-angle au sommet ϕ et l'on détermine le diamètre effectif $2w_0$ à l'aide de la formule suivante, formule qui sera établie par la suite et dans laquelle P_∞ est une quantité indépendante du demi-angle au sommet ϕ :

$$P(\phi) = P_\infty \left[1 - \exp(-2(\pi^2 w_0^2 / \lambda^2) \sin^2 \phi) \right] \quad (1)$$

En mesurant la puissance lumineuse $P(\phi)$ pour différentes valeurs de ϕ , obtenues en changeant l'ouverture de l'objectif 4, on peut calculer le diamètre

effectif $2w_0$ à la longueur d'onde λ , par exemple à l'aide de la méthode des moindres carrés appliquée à la formule (1).

Avec le dispositif objet de l'invention, dont
 5 on a décrit une réalisation particulière, on peut réaliser une mesure d'atténuation spectrale de la fibre optique 2, avec une ouverture de l'objectif 4 fixée (par exemple la plus grande des ouvertures réalisables), puis, sans avoir à remanipuler la fibre optique 2, ce qui repré-
 10 sente un avantage par rapport à l'art antérieur, on peut relever la puissance lumineuse $P(\phi)$ pour différentes valeurs de ϕ et pour chaque longueur d'onde λ souhaitée, de façon à déterminer le diamètre effectif $2w_0$ correspondant à ces longueurs d'onde.

15 La formule (1) peut être établie de la manière suivante :

On désigne par $z'z$ (figure 3) l'axe de la fibre optique 2, cet axe étant d'ailleurs confondu avec ledit axe 7 de révolution. L'axe $z'z$ rencontre la face
 20 d'entrée 11 de la fibre optique 2 en un point O. On définit deux axes Ox et Oy (Oy n'étant pas représenté) perpendiculaires, dans le plan de la face d'entrée 11.

Une onde plane incidente sur cette face d'entrée 11 et de vecteur d'onde \vec{k} dans le plan xOz et
 25 incliné d'un angle θ par rapport à l'axe $z'z$ a pour amplitude normalisée sur cette face d'entrée

$$E_0(x) = A^{-1/2} \exp(-i k x \sin \theta)$$

où A est l'aire de la section droite du faisceau incident sur la face d'entrée 11, k étant égal à $2\pi/\lambda$.

30 L'amplitude du mode fondamental guidé dans la fibre optique 2, sur la face d'entrée, peut être représentée par une fonction gaussienne de la forme $\exp(-r^2/w_0^2)$, w_0 étant le rayon à e^{-2} en intensité relative de l'onde gaussienne qui fournit le meilleur
 35 rendement d'excitation du mode guidé et r étant égal à $(x^2 + y^2)^{1/2}$.

Le rendement d'excitation $\rho_i(\theta)$ du mode fondamental par l'onde plane incidente précédente est égal à $|\hat{\rho}_i(\theta)|^2$ avec :

$$\hat{\rho}_i(\theta) = w_0^{-1} 2^{1/2} (\pi A)^{-1/2} \iint \exp(-r^2/w_0^2) \exp(-ikx \sin\theta) dx dy$$

5 où $w_0^{-1} 2^{1/2} (\pi A)^{-1/2}$ est un facteur de normalisation.

L'onde plane étant beaucoup plus étendue que le mode, l'aire A est très supérieure à πw_0^2 et l'on intègre sur tout le plan xOy, en tenant compte du fait que r^2 peut s'écrire $x^2 + y^2$:

$$10 \quad \hat{\rho}_i(\theta) = w_0^{-1} 2^{1/2} (\pi A)^{-1/2} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp(-y^2/w_0^2) dy \int_{-\infty}^{+\infty} \exp(-x^2/w_0^2 - ikx \sin\theta) dx$$

En posant : $\sin u = 2(kw_0)^{-1} = \lambda(\pi w_0)^{-1}$, on obtient

$$\hat{\rho}_i(\theta) = w_0 (2\pi/A)^{1/2} \exp(-\sin^2 \theta / \sin^2 u)$$

15

Donc

$$\rho_i(\theta) = |\hat{\rho}_i(\theta)|^2 = 2\pi w_0^2 / A \exp(-2 \sin^2 \theta / \sin^2 u)$$

Ce rendement $\rho_i(\theta)$ est également celui qui correspond à une onde plane quelconque, incidente sur la face 11 et dont le vecteur d'onde a pour module k et est incliné d'un angle θ par rapport à l'axe z'z, du fait des propriétés dudit faisceau incident rappelées ci-dessous.

La puissance $P(\phi)$ correspond à une excitation globale de la fibre optique par le faisceau de lumière incohérente éclairant uniformément la surface A très supérieure à πw_0^2 , ce faisceau ayant une intensité qui présente une symétrie de révolution autour de l'axe η et étant tel que la puissance lumineuse dP transportée par ce faisceau dans un angle solide $d\Omega$ autour d'une direction faisant l'angle θ avec l'axe η ($0 \leq \theta \leq \phi$) soit égale à $P_0 \cos \theta d\Omega$ où P_0 est un facteur de proportionnalité. Cette puissance $P(\phi)$ vaut donc :

$$\begin{aligned}
 P(\phi) &= \int_0^\phi \rho_i(\theta) dP = \int_0^\phi \rho_i(\theta) P_0 \cos \theta d\Omega \\
 &= P_0 \int_0^\phi 2\pi \rho_i(\theta) \sin \theta \cos \theta d\theta \\
 &= P_0 \lambda^2/A \left[1 - \exp(-2 \sin^2 \phi / \sin^2 u) \right]
 \end{aligned}$$

ce qui donne bien la formule (1) en posant

5 $P_\infty = P_0 \lambda^2/A$ et en remplaçant $\sin u$ par sa valeur $\lambda (\pi - w_0)^{-1}$.

REVENDECATIONS

1. Procédé de mesure du diamètre effectif $2w_0$ du mode guidé dans une fibre optique (2) monomode, à une longueur d'onde λ , ladite fibre optique (2) admettant une face d'entrée (11), caractérisé en ce qu'il
- 5 consiste :
- à diriger sur ladite face d'entrée (11) un faisceau de lumière incohérente de longueur d'onde λ , incident sur ladite face d'entrée (11) selon un cône (12) de demi-angle au sommet ϕ , ledit faisceau ayant une
 - 10 section droite sur la face d'entrée (11), supérieure à celle du coeur de la fibre optique (2), ayant une intensité qui présente une symétrie de révolution autour de l'axe (7) dudit cône (12) et étant tel que la puissance lumineuse transportée par ce faisceau dans un angle
 - 15 solide infiniment petit d Ω autour d'une direction (14) faisant un angle θ avec ledit axe (7) soit proportionnelle à $\cos \theta$ d Ω , la fibre optique (2) étant disposée selon cet axe (7) ,
 - à mesurer la puissance lumineuse $P (\phi)$
 - 20 transmise par cette fibre optique (2), en fonction du demi-angle au sommet ϕ , et
 - à déterminer le diamètre effectif $2w_0$ à l'aide de la formule suivante, dans laquelle P_∞ est une quantité indépendante du demi-angle au sommet ϕ :

25
$$P (\phi) = P_\infty \left[1 - \exp (-2(\pi^2 w_0^2 / \lambda^2) \sin^2 \phi) \right]$$

2. Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce que ledit faisceau lumineux est obtenu à l'aide d'une source (3) de rayonnement incohérent de longueur d'onde λ , dont on forme l'image sur ladite face
- 30 d'entrée (11), grâce à des moyens optiques (4), l'image de la source (3) ayant une taille supérieure au diamètre de coeur de la fibre optique (2), ladite source (3) admettant un diagramme de rayonnement qui présente une symétrie de révolution autour d'un axe formant l'axe (7)

dudit cône (12) et étant telle que la puissance lumineuse émise par elle dans un angle solide infiniment petit $d\Omega_s$ autour d'une direction (8) faisant un angle θ_s avec ledit axe (7) soit proportionnelle à $\cos \theta_s d\Omega_s$,
5 lesdits moyens optiques (4) conservant la loi angulaire du rayonnement et permettant de faire varier le demi-angle au sommet ϕ .

3. Procédé selon la revendication 2, caractérisé en ce que la source (3) comprend une lampe (9)
10 quartz-halogène à filament de tungstène, munie de moyens (6) de sélection de longueur d'onde, de façon à obtenir le rayonnement de longueur d'onde λ .

4. Procédé selon l'une quelconque des revendications 2 et 3, caractérisé en ce que les moyens
15 optiques (4) consistent en un objectif à ouverture variable.

5. Procédé selon la revendication 4, caractérisé en ce que l'on fait varier le demi-angle au sommet ϕ à l'aide de ladite ouverture variable, de façon à
20 obtenir plusieurs couples $(\phi, P(\phi))$, et que l'on détermine, à l'aide desdits couples et de ladite formule, le diamètre effectif $2w_0$ par la méthode des moindres carrés.

6. Procédé selon l'une quelconque des revendications 2 à 5, caractérisé en ce que la taille de
25 l'image de la source (3) est au moins cinq fois plus grande que le diamètre de coeur de la fibre optique (2).

7. Dispositif de mesure du diamètre effectif $2w_0$ du mode guidé dans une fibre optique monomode, à une
30 longueur d'onde λ , pour la mise en oeuvre du procédé selon la revendication 2, caractérisé en ce qu'il comprend, dans l'ordre, ladite source (3), lesdits moyens optiques (4) et des moyens (5) de mesure de ladite puissance lumineuse $P(\phi)$ transmise par la fibre optique (2), celle-ci étant interposée entre les moyens
35 optiques (4) et les moyens (5) de mesure.

