

A1

**DEMANDE  
DE BREVET D'INVENTION**

(21)

**N° 82 00178**

---

(54) Fibres optiques à grande bande passante.

(51) Classification internationale (Int. Cl. <sup>3</sup>). G 02 B 5/14.

(22) Date de dépôt..... 8 janvier 1982.

(33) (32) (31) Priorité revendiquée :

(41) Date de la mise à la disposition du  
public de la demande..... B.O.P.I. — « Listes » n° 28 du 18-7-1983.

---

(71) Déposant : QUARTZ & SILICE. — FR.

(72) Invention de : Pierre Aldebert.

(73) Titulaire : *Idem* (71)

(74) Mandataire : Saint-Gobain Recherche,  
39, quai Lucien-Lefranc, 93304 Aubervilliers Cedex.

## FIBRES OPTIQUES A GRANDE BANDE PASSANTE

5

La présente invention concerne les systèmes de transmission à fibres optiques et, plus particulièrement, des fibres optiques multimodes à faible atténuation et à faible dispersion.

Il est connu d'utiliser des fibres optiques dites "à saut d'indice" comprenant une zone centrale ou âme, entourée d'une couche concentrique d'indice de réfraction inférieur. Les signaux optiques se propagent dans l'âme d'un bout à l'autre de la fibre grâce aux multiples réflexions totales qu'ils subissent à l'interface de l'âme et de la couche externe.

15 Ces fibres, généralement en verres de silice de très grande pureté, présentent de ce fait une très faible atténuation du signal optique transmis ; malheureusement elles sont à l'origine d'une déformation non négligeable dudit signal.

En effet, dans le cas d'une fibre à modes multiples, les signaux d'entrée envoyés au temps  $t_1$  vont suivre des parcours différents, ce qui, dans un milieu d'indice constant, va se traduire à la sortie par des signaux échelonnés sur une durée  $t_2, t_2 + \Delta t$ .

Cette dispersion temporelle limite le nombre d'informations susceptibles d'être transmises par unité de temps. Cette propriété définit ce que l'on appelle la bande passante, qui, pour ce type de fibre, ne dépasse pas quelques dizaines de mégahertz.kilomètre.

Pour atténuer cet inconvénient, il est connu d'utiliser des fibres optiques dont l'indice de réfraction décroît selon une loi parabolique, depuis l'axe jusqu'à la périphérie. En principe, un tel profil d'indice de réfraction permet aux signaux de se propager à des vitesses différentes selon leur mode de parcours, ce qui a pour effet d'éliminer la dispersion temporelle et donc de fournir des bandes passantes théoriquement infinies ; en pratique la dispersion n'est pas nulle mais les bandes réellement obtenues sont généralement supérieures à 4 à 500 MHz.km et peuvent même dépasser le gigahertz.km.

Ces deux catégories de fibres se distinguent également au plan économique : les fibres à saut d'indice sont obtenues à partir de préformes fabriquées à des coûts relativement modérés, alors que les fibres à profil parabolique nécessitent la mise en œuvre de procédés

longs et onéreux.

La présente invention a pour objet des fibres optiques qui réunissent à la fois les avantages économiques conférés par les procédés de fabrication des fibres à saut d'indice, et les caractéristiques techniques des fibres à profil parabolique.

La présente invention a pour objet des fibres optiques qui sont constituées d'un coeur cylindrique à indice de réfraction constant entouré d'une gaine d'indice variable, et dont les dimensions radiales ainsi que les variations d'indice de réfraction sont régies par des relations mathématiques déterminées comme on le verra ci-après.

La nature du profil d'indice de réfraction des fibres optiques selon l'invention et les avantages conférés par ledit profil sont exposés en détail ci-après en se référant aux figures jointes au présent mémoire, et selon lesquelles :

- La figure 1 est une représentation schématique en coordonnées réelles du profil d'indice de réfraction d'une fibre selon l'invention,

- La figure 2 est une représentation en coordonnées réduites du profil d'indice de réfraction d'une fibre selon l'invention,

- La figure 3 est la représentation graphique de la relation qui lie le saut d'indice  $\Delta n$  exprimé en coordonnées réduites et le rapport des rayons de l'âme et de la gaine,

- Les figures 4, 5 et 6 sont des représentations graphiques de la fonction de transfert en fonction de la fréquence, pour une source lambertienne.

- Les figures 7 et 8 représentent l'une en coordonnées réduites, l'autre en coordonnées réelles, le profil d'indice de réfraction d'une fibre selon l'exemple n°1.

Selon le graphique représenté à la figure 1, qui montre en coordonnées réelles les variations de l'indice de la fibre en fonction du rayon  $r$ , il apparaît, qu'en substance, les fibres optiques selon l'invention sont constituées d'une âme cylindrique de rayon  $a_0$  présentant un indice de réfraction  $n_0$ , entourée par une gaine de rayon  $a$  où l'indice de réfraction varie continûment de l'âme jusqu'à la périphérie d'une valeur  $n_1$  à une valeur inférieure  $n_e$ . La transition entre l'âme et la gaine s'effectue par un saut d'indice  $\Delta n = n_0 - n_1$  dont la valeur est fonction du rapport  $\frac{a_0}{a}$ .

Afin d'exposer la portée générale de l'invention il est utile de passer par l'intermédiaire de coordonnées réduites, tant pour expri-

mer les différentes relations qui définissent le profil d'indice de réfraction des fibres optiques selon l'invention, que pour en donner certaines représentations graphiques.

Ainsi dans la suite de la description on utilisera les notations réduites suivantes :

Les distances radiales, qui sont représentées en abscisses dans les graphiques, sont exprimées par :

$$x = \frac{r}{a}$$

x variant de 0 à 1.

Les variations d'indice de réfraction, représentées en ordonnées dans les graphiques, sont exprimées par :

$$U = \frac{n_o^2 - n^2}{n_o^2 - n_e^2}$$

$n_o$  = indice de réfraction de l'âme de la fibre

$n_e$  = indice de réfraction à la périphérie de la gaine

Dans ce système le saut d'indice de réfraction est symbolisé par  $E_o$  et a lieu pour  $x_o = \frac{a_o}{a}$ .

La figure 2, utilisant ces notations, donne une autre représentation du profil d'indice de réfraction des fibres optiques selon l'invention. Ces fibres se caractérisent par un profil d'indice de réfraction qui est régi par les relations suivantes :

$$\frac{\pi}{x_o} = \frac{\pi}{2} + \text{Arc sin } (2E_o - 1) + 2 \left( \frac{1 - E_o}{E_o} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

$$x(u) = \frac{x_o}{\pi} \left[ \text{Arc sin } \left( \frac{2E_o}{u} - 1 \right) + \frac{\pi}{2} + 2 \left( \frac{u - E_o}{E_o} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (2)$$

Sachant que pour  $x < x_o$   $U = 0$   
et pour  $x = x_o$   $U = E_o$

La relation qui existe entre  $E_o$  et  $x_o$  est représentée graphiquement par la courbe de la figure 3.

Lorsque les relations (1) et (2) sont satisfaites, on démontre par le calcul, en se plaçant dans le cas d'une injection lambertienne des rayons lumineux à l'entrée d'une fibre d'un kilomètre de longueur, que le module de la fonction de transfert en fonction de la fréquence reste supérieur à 0,5 pour des valeurs de  $x_o$  inférieures à 0,83.

Cette variation de la fonction de transfert est représentée graphiquement pour trois valeurs de  $x_o$  (figures 4, 5 et 6).

Dans les trois cas figurés on constate effectivement que la fonction de transfert reste supérieure à 0,5 quelle que soit la fréquence et donc, qu'en théorie, la bande passante est infinie.

Toutefois ces représentations montrent que la courbe se rapproche d'autant plus de la valeur critique de 0,5 que le rayon de l'âme augmente par rapport au rayon de la gaine. A cet égard le module de la fonction de transfert correspondant à  $x_0 = 0,829$  constitue un exemple limite. Au-delà de cette valeur, les fibres optiques correspondantes présentent une bande passante, exprimée en MHz.km égale à la fréquence où la fonction de transfert est égale à 0,5 ; ceci se produit pour une fréquence égale ou inférieure à une trentaine de MHz.km.

Pour obtenir des fibres optiques dont la bande passante est élevée, il convient de respecter la condition suivante :

$$x_0 < 0,83 \quad (3)$$

La fabrication des fibres selon l'invention passe donc nécessairement par la définition de ses paramètres de structure.

Ainsi, après avoir choisi l'indice de réfraction de l'âme,  $n_0$ , celui de la périphérie de la gaine,  $n_e$ , et le rapport  $x_0$ , on procède aux calculs suivants :

Dans une première phase on détermine le profil de la fibre en coordonnées réduites. En appliquant la relation (1), ou en utilisant la courbe de la figure 3, on détermine  $E_0$  ; puis en appliquant la relation (2) on calcule point par point le profil de la gaine  $x(u)$ .

Dans une deuxième phase on définit la fibre optique en valeurs réelles d'indice de réfraction et de rayon.

On calcule tout d'abord l'indice de réfraction  $n_1$ , définissant le saut d'indice, par la relation :

$$n_1^2 = n_0^2 - E_0 (n_0^2 - n_e^2) \quad (4)$$

Puis on calcule point par point le profil réel de la gaine grâce à la relation suivante :

$$n^2 = n_0^2 - u (n_0^2 - n_e^2) \quad (5)$$

Les paramètres de structure étant ainsi définis, la fibre optique peut être fabriquée par tout procédé approprié connu de l'homme de l'art ainsi qu'il ressort des exemples donnés ci-après :

#### Exemple n° 1

La fibre optique choisie est constituée d'un coeur en silice synthétique pure, d'indice de réfraction  $n_0 = 1,4585$ , entouré d'une gaine en silice dopée au fluor dont l'indice de réfraction décroît jusqu'à sa périphérie pour atteindre la valeur  $n_e = 1,4530$

Le diamètre de la fibre sera de 200  $\mu\text{m}$  et celui du coeur de 68,5  $\mu\text{m}$ . On en déduit  $x_0 = 0,3426$ .

D'après la relation (1) on déduit  $E_0 = 0,05$  et d'après la relation (2) on calcule la courbe  $x(u)$ , par exemple pour  $x = 0,5$ ,  $u = 0,2086$  et pour  $x = 0,9$ ,  $u = 0,8004$ . On obtient le profil d'indice de la fibre en coordonnées réduites ainsi que le représente la figure 7.

On détermine ensuite le profil réel d'indice de réfraction de la fibre en appliquant les relations (4) et (5). On déduit  $n_1 = 1,4582$  et la variation d'indice de la gaine, par exemple pour  $x = 0,5$  ou  $r = 43,8 \mu\text{m}$ ,  $n = 1,4573$  ; pour  $x = 0,9$  ou  $r = 78,7 \mu\text{m}$ ,  $n = 1,4541$ . Ce profil réel est représenté à la figure 8.

La fibre ainsi définie est obtenue par étirage d'une préforme fabriquée selon un procédé de dépôt de vapeurs chimiques (CVD), tel que décrit ci-après :

On place un tube de verre de silice sur un tour verrier équipé d'un chalumeau oxyhydrique ; ce tube, long de 1500 mm, présente un diamètre externe de 18 mm et un diamètre interne de 15 mm.

Dans une première phase, on envoie dans ce tube un mélange gazeux de tétrachlorure de silicium, d'hexafluorure de soufre et d'oxygène. Le profil d'indice de réfraction de la gaine est réalisé en modifiant la teneur du mélange en hexafluorure de soufre au cours du dépôt, selon des méthodes connues de l'homme de l'art. L'épaisseur de la couche déposée à l'issue de cette première phase est de 1,04 mm.

Au cours d'une seconde phase on dépose une couche de silice pure, de 0,16 mm d'épaisseur, obtenue par réaction du mélange tétrachlorure de silicium-oxygène.

Le tube ainsi préparé est transformé par chauffage sous vide en une baguette pleine, de 12,85 mm de diamètre.

La couche externe de cette baguette, constituée par la paroi du tube initial, est éliminée par rectification puis attaque par l'acide fluorhydrique.

Après poli à la flamme on obtient une baguette, ou préforme, de 8,13 mm de diamètre, renfermant un coeur en silice pure de 2,83 mm.

La fibre optique étirée à partir de cette préforme est enfin revêtue d'une couche de protection selon les techniques connues.

A la longueur d'onde de 1300 nanomètres, la fibre obtenue présente une atténuation de 2,5 dB/km et une bande passante supérieure à 1 GHz.km.

Exemple n° 2

La fibre optique choisie est constituée d'un cœur en silice synthétique pure, d'indice de réfraction  $n_0 = 1,4585$ , entouré d'une gaine en silice dopée au fluor dont l'indice de réfraction décroît jusqu'à sa périphérie pour atteindre la valeur  $n_e = 1,4439$ .

Le diamètre de la fibre sera de  $160 \mu\text{m}$  et celui du cœur de  $80 \mu\text{m}$ .

Comme dans l'exemple précédent on détermine l'indice  $n_1 = 1,4569$  et le profil d'indice de la gaine.

10 La fibre optique ainsi définie est obtenue par étirage d'une préforme fabriquée selon le procédé suivant :

Dans une première phase on fabrique un lingot de silice synthétique pure par dépôt axial de particules de silice sur une ébauche en rotation. Ces particules sont obtenues par injection d'un mélange gazeux de tétrachlorure de silicium et d'oxygène, dans la flamme d'un brûleur à plasma inductif. Après rectification et nettoyage superficiel à l'acide fluorhydrique dilué, on obtient un lingot cylindrique de 40 mm de diamètre et de 500 mm de long.

Dans une deuxième phase le lingot est monté sur un tour vertical et soumis à un mouvement de rotation et à un mouvement de va-et-vient transversal à la flamme du brûleur à plasma inductif. Dans ces conditions on effectue un dépôt latéral de silice dopée au fluor, grâce à la réaction dans la flamme du plasma d'un mélange de tétrachlorure de silicium, d'hexafluorure de soufre et d'oxygène. Le profil d'indice du revêtement latéral est obtenu en modifiant la teneur du mélange en hexafluorure de soufre.

Le procédé de fabrication appliqué dans cet exemple est notamment décrit dans la demande de brevet français publié sous le numéro 2.432.478.

30 La transformation à haute température du lingot en préforme dans un four à induction, puis l'étirage de ladite préforme conduisent à une fibre optique qui présente une atténuation inférieure à 3,5 dB/km et une bande passante supérieure à 700 MHz.km, pour la longueur d'onde de 820 nanomètres.

35 Le saut d'indice de réfraction  $\Delta n = n_0 - n_1$  doit être effectué avec précision ; tout écart entre le  $\Delta n$  théorique et le  $\Delta n$  réel peut conduire à une diminution considérable de la bande passante ainsi que le montrent les essais suivants :

La fibre optique décrite dans l'exemple n°2 doit présenter un

saut d'indice  $\Delta n = 0,0016$ . A partir de cette référence ont été fabriquées d'autres fibres optiques qui présentent le même  $x_0$  mais dont le  $\Delta n$  est supérieur ou inférieur à 0,0016.

L'influence des variations de  $\Delta n$  sur la bande passante mesurée à 820 nanomètres est résumée dans le tableau ci-après :

TABLEAU I

	$\Delta n \times 10^4$	B.P. (MHz)
10	28	150
	23	300
	20	600
	16	> 700
	12	600
15	9	300
	4	150

Il ressort de ce tableau qu'une erreur relative de 25 % sur le saut d'indice diminue la valeur de la bande passante à 600 MHz, dans la configuration de la fibre proposée.

Il n'est évidemment pas possible de présenter les calculs complets pour toutes les fibres appartenant au domaine de l'invention. Toutefois, pour souligner l'importance de  $\Delta n$  sur les caractéristiques des fibres, le tableau ci-après indique l'erreur relative à ne pas dépasser pour conférer aux fibres définies par  $\frac{n_0 - n_e}{n_0} = 1\%$  une bande

passante au moins égale à 600 MHz.km.

TABLEAU II

	$x_0$	erreur sur $\Delta n$ (%)
30	0,20	47
	0,38	38
	0,40	31
	0,50	25
	0,60	19
35	0,70	14
	0,80	9

A travers cette série d'exemples il ressort que le saut d'indice doit être d'autant mieux effectué que le rayon du coeur augmente par rapport au rayon de la gaine.



Bien entendu, la description qui précède n'est pas limitative et l'invention peut être mise en oeuvre selon d'autres variantes, sans que l'on sorte de son cadre.

5

10

15

20

25

30

35

## REVENDICATIONS

1. Fibre optique comprenant un coeur en silice vitreuse, dopée ou non, de rayon  $a_0$  et dont l'indice de réfraction  $n_0$  est constant, entouré d'une gaine de silice vitreuse dopée de rayon  $a$ , où l'indice de réfraction varie continûment jusqu'à une valeur  $n_e$ , inférieure à  $n_0$ , caractérisée en ce que le passage du coeur à la gaine s'effectue par un saut d'indice  $\Delta n = n_0 - n_1$ ,  $n_1$  étant supérieur à  $n_e$ , qui obéit à la relation suivante :

$$\frac{\pi}{x_0} = \frac{\pi}{2} + \text{Arc sin } (2E_0 - 1) + 2 \left( \frac{1 - E_0}{E_0} \right)^{\frac{1}{2}}$$

en posant  $x_0 = \frac{a_0}{a} < 0,83$  et  $E_0 = \frac{\Delta n}{n_0 - n_e}$

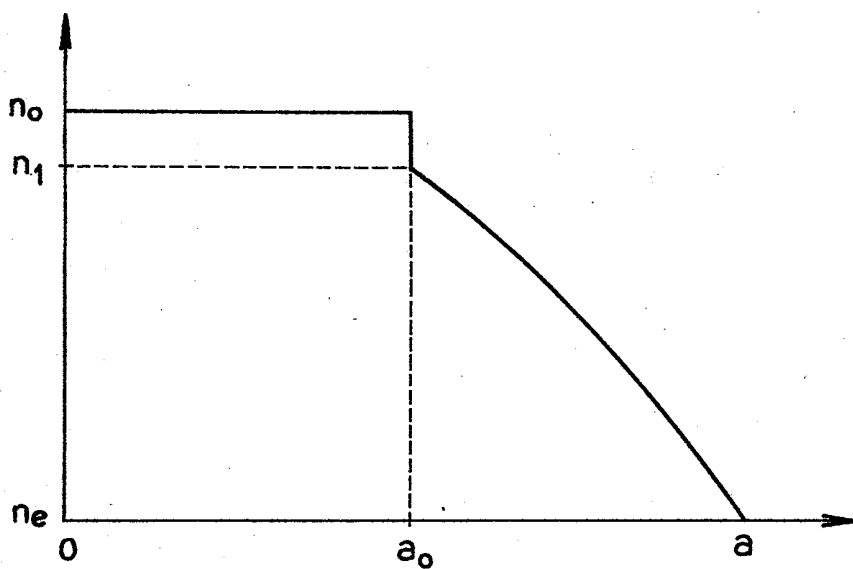
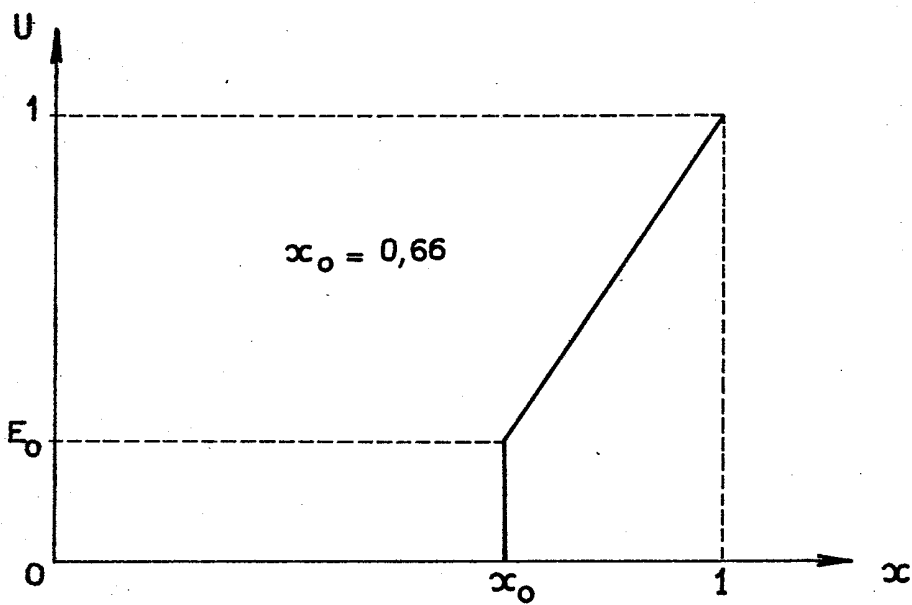
et que la variation d'indice de réfraction de la gaine obéit à la relation suivante :

$$x(u) = \frac{x_0}{\pi} \left[ \text{Arc sin } \left( \frac{2E_0}{u} - 1 \right) + \frac{\pi}{2} + 2 \left( \frac{u - E_0}{E_0} \right)^{\frac{1}{2}} \right]$$

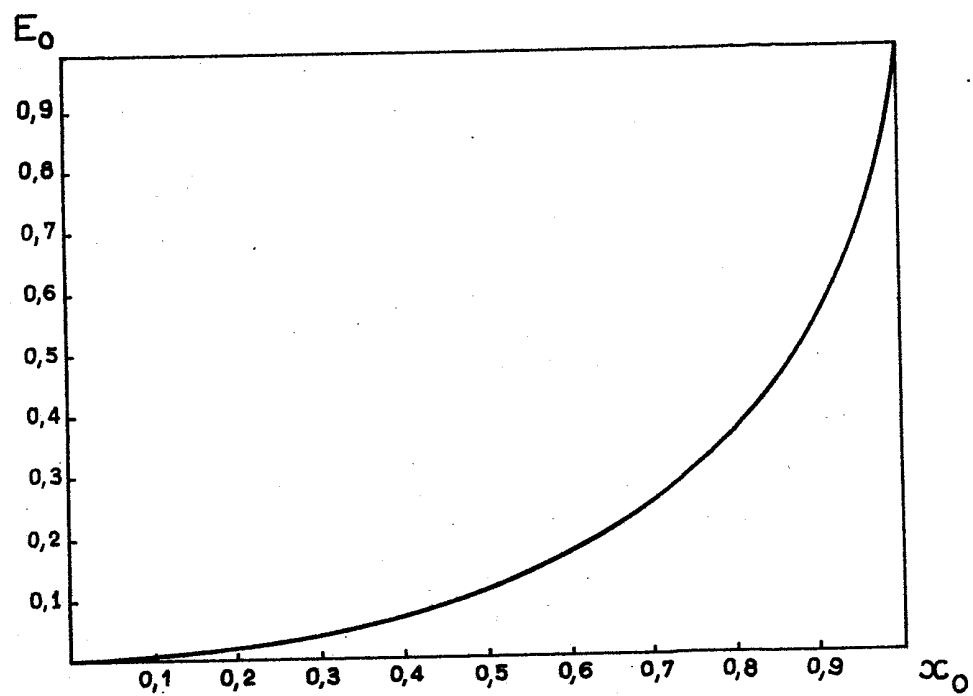
en posant  $u = \frac{n_0^2 - n^2}{n_0^2 - n_e^2}$

2. Fibre optique selon la revendication 1, caractérisée en ce que  $x_0$  est compris de préférence entre 0,3 et 0,7.

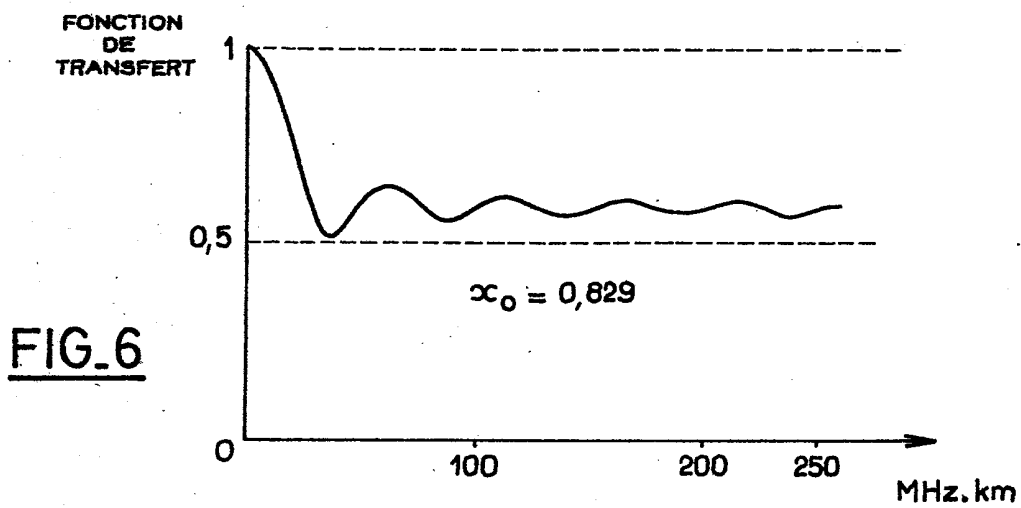
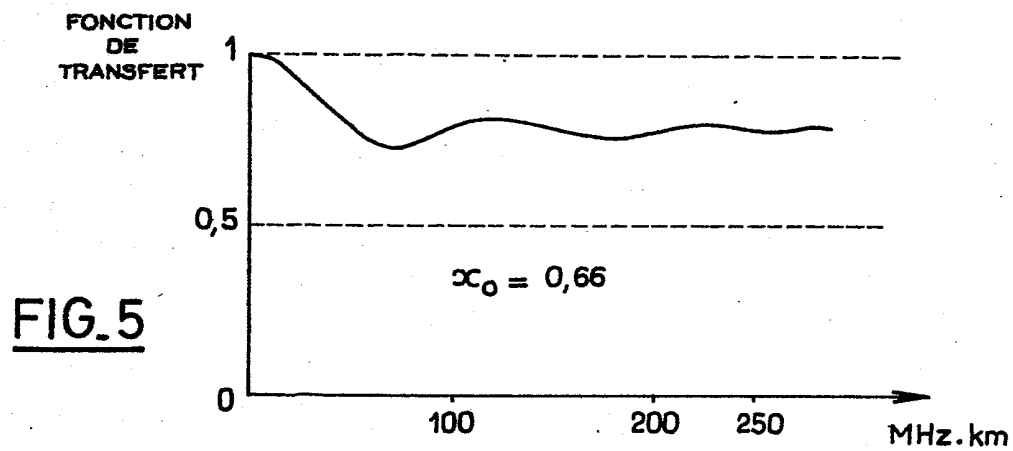
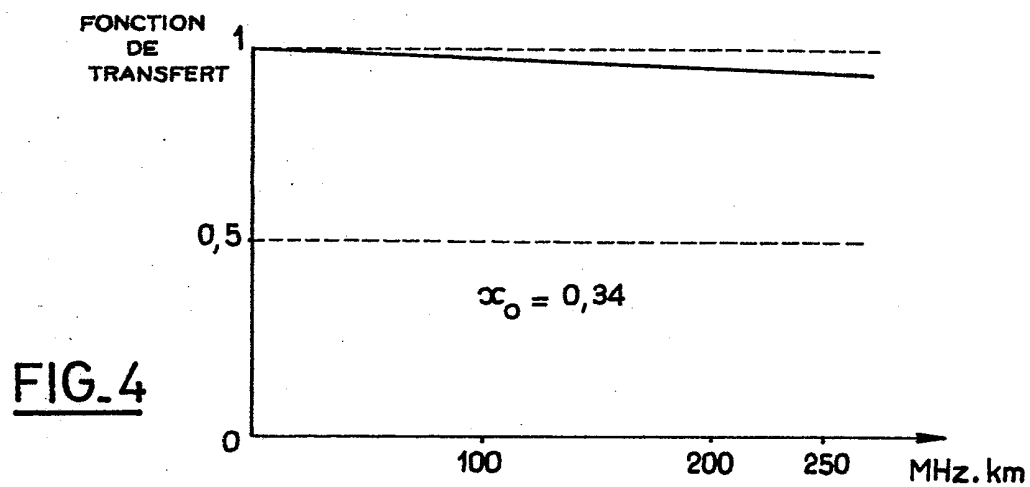
1/4

FIG. 1FIG. 2

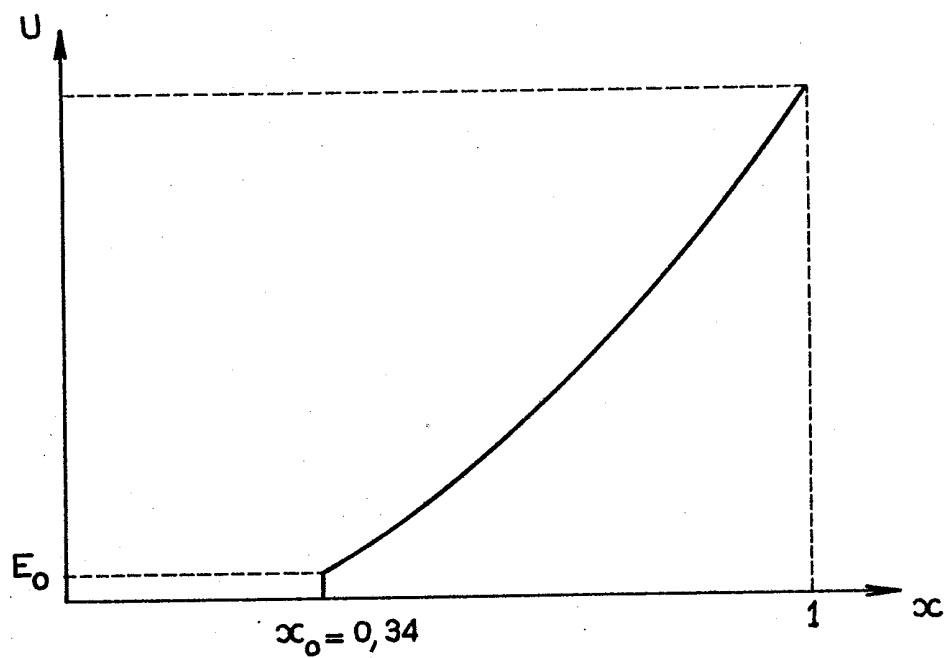
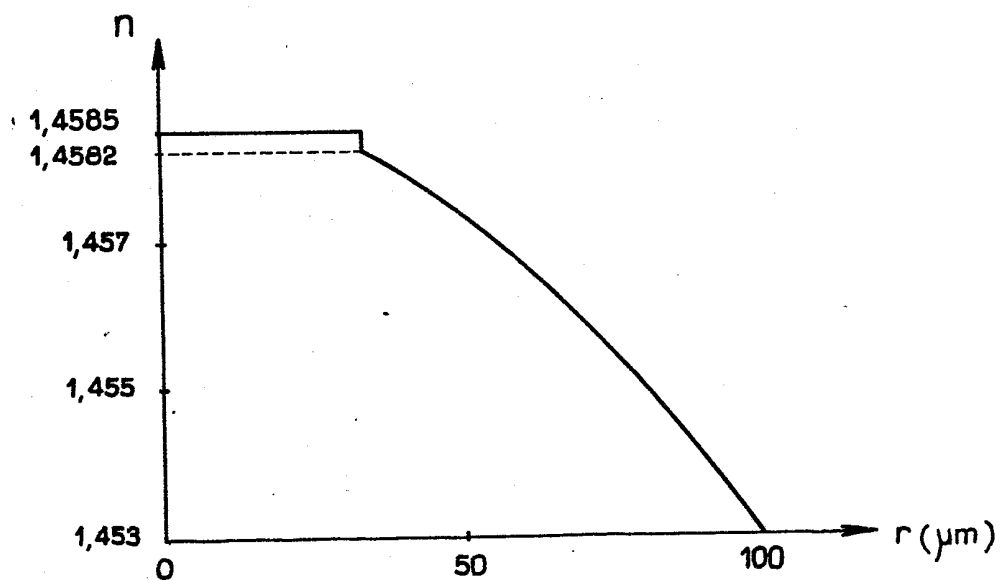
2/4

FIG.3

3 / 4



4 / 4

FIG.7FIG.8