



SCHWEIZERISCHE EIDGENOSSENSCHAFT
BUNDESAMT FÜR GEISTIGES EIGENTUM

Int. Cl.³: G 02 B 5/172

Erfindungspatent für die Schweiz und Liechtenstein

Schweizerisch-liechtensteinischer Patentschutzvertrag vom 22. Dezember 1978

PATENT SCHRIFT A5

11

643 072

21 Gesuchsnummer: 3292/83

62 Teilgesuch von: 2021/79

22 Anmeldungsdatum: 01.03.1979

30 Priorität(en): 03.03.1978 US 883214

24 Patent erteilt: 15.05.1984

45 Patentschrift
veröffentlicht: 15.05.1984

73 Inhaber:
Corning Glass Works, Corning/NY (US)

72 Erfinder:
Dr. Robert Olshansky, Addison/NY (US)

74 Vertreter:
Dr. A.R. Egli & Co., Patentanwälte, Zürich

54 Optischer Wellenleiter.

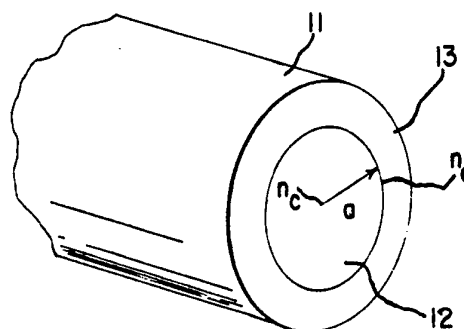
57 Der optische Wellenleiter für ein Kommunikationssystem hat einen Kern und einen Mantel mit mehr als drei glasbildenden Komponenten. Das Zusammensetzungsprofil $C_j(r)$ des Kerns entsprechend den Mengenanteilen in Abhängigkeit vom Mittelpunktsabstand ist bestimmt durch die Gleichung:

$$C_j(r) = C_j(o) + \sum_{i=1}^N C_{ji}(r/a)^{\alpha_i}$$

$$\begin{aligned} j &= 1 \dots p \\ i &= 1, \dots, N \\ N &\geq 2, \end{aligned}$$

wobei

a der Kernradius ist,
 C_{ji} und α_i so bestimmt sind, dass sich verminderte Pulsdispersionen ergeben und
 $C_j(o)$ die Konzentration bzw. Zusammensetzung bei
 $r = 0$ angibt.



PATENTANSPRÜCHE

1. Optischer Wellenleiter mit Mantel und Kern, bestehend aus $p \geq 3$ glasbildenden Komponenten, deren Zusammensetzungsprofil, der Mengenanteile in Abhängigkeit vom Mittelpunktsabstand bestimmt ist, dadurch gekennzeichnet, dass das Zusammensetzungsprofil $C_j(r)$ bestimmt ist durch die Gleichung:

$$C_j(r) = C_j(0) + \sum_{i=1}^N C_{ji} (r/a)^{\alpha_i}$$

$j=1 \dots p, i=1, \dots, N, N \geq 2,$

wobei a der Kernradius ist und der Koeffizient C_{ji} und der Exponent α_i vom Laufindex i bzw. j abhängige Konstanten sind, die so bestimmt sind, dass sich verminderte Pulsdispersionen ergeben und $C_j(0)$ die Konzentration bzw. Zusammensetzung bei $r=0$ angibt.

2. Verfahren zur Herstellung des optischen Wellenleiters nach Patentanspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass aus einer Vielzahl (p) glasbildender Komponenten ein Kern gebildet wird, wobei das Zusammensetzungsprofil der Mengenanteile der Komponenten in Abhängigkeit vom Mittelpunktsabstand bestimmt wird nach der Gleichung:

$$C_j(r) = C_j(0) + \sum_{i=1}^N C_{ji} (r/a)^{\alpha_i}$$

$j=1, \dots, p, i=1, \dots, N, p \geq 3, N \geq 2,$

wobei der Koeffizient C_{ji} und der Exponent α_i so gewählt werden, dass sich verminderte Pulsdispersionen ergeben, worauf auf den Kern ein Mantel mit geringerem Brechungsindex aufgebracht wird.

Die Erfindung betrifft einen optischen Wellenleiter nach dem Oberbegriff des Patentanspruchs 1 sowie ein Verfahren zu seiner Herstellung.

Die Übertragung von Lichtwellen in optischen Wellenleitern folgt ähnlichen physikalischen Gesetzen wie die der Übertragung bzw. Fortpflanzung von Mikrowellen und kann betrachtet werden in Begriffen von Moden, wobei jeder Modus eigene Grössen für seine Übertragung (Fortpflanzung) und sein elektrisches Feld aufweist. Es gibt Wellenleiter für Licht- bzw. Lichtimpulse mit nur einem Modus (1-Modus-Wellenleiter) und Wellenleiter für Licht bzw. Lichtpulse mit mehreren oder vielen Moden (Multimoden-Wellenleiter).

1-Modus-Wellenleiter haben den Vorteil sehr geringer Dispersion, wegen der geringen numerischen Öffnung und/oder des geringen Kerndurchmessers ist jedoch das Eingeben optischer Signale in 1-Modus-Wellenleiter schwierig. Multimoden-Wellenleiter haben grössere Kerndurchmesser bzw. grössere numerische Aperturen, sie sind daher oft das bevorzugte Medium zur Übertragung optischer Signale, da in sie relativ leicht Licht von Injektionslasern, aber auch inkohärentes Licht mit breitem Spektrum, insbesondere von lichtemittierenden Dioden (LEDs) eingegeben werden kann. Jedoch pflanzen sich dann in einem Multimoden-Wellenleiter Tausende von Moden fort, jeder Modus (oder jede Gruppe von Moden) mit einer etwas verschiedenen Gruppengeschwindigkeit.

Ein kurzer Impuls am Eingang, der aus vielen geführten Moden besteht, wird während der Übertragung längs des Leiters aufgespalten in eine Folge von Pulsen, die zu unterschiedlichen Zeiten am Auslassende des Wellenleiters ankommen. Diese Pulsdispersion ist die Hauptursache der gesamten Dispersion in diesen Wellenleitern.

Ursprünglich bestanden die Wellenleiter aus einem Kern mit über seinem Querschnitt unveränderlichem Brechungsindex, der von einem Mantel mit geringerem Brechungsindex als dem des Kerns umgeben ist. Bei diesen ursprünglichen Wellenleitern nimmt die zum Zurücklegen einer bestimmten Distanz erforderliche Zeit mit der Modenzahl zu (die Geschwindigkeit nimmt ab). Diese Verzögerungsverzerrung, also die Zeitdifferenz zwischen dem am Ausgang eintreffenden schnellsten Modus und dem langsamsten Modus ist sehr gross.

Es sind bereits Wellenleiter bekannt, bei denen der Brechungsindex des Kerns in Abhängigkeit vom Mittelpunktsabstand variiert (Gradienten-Wellenleiter). Diese Wellenleiter weisen bedeutend geringere Pulsdispersion auf. Dieser Effekt ist beschrieben von D. Gloge et al. in «Multimode Theory of Graded-Core Fibers», erschienen im November 1973 im «Bell System Technical Journal», Seiten 1563 bis 1578; dabei nimmt der Brechungsindex des Kerns kontinuierlich ab von einem Maximum im Mittelpunkt zu einem geringeren Wert an der Aussenfläche des Kernes (an der Kern-Mantelfläche). Die Indexverteilung («Index» steht nachfolgend für «Brechungsindex») ist dabei gegeben durch die Gleichung

$$n(r) = n_c [1 - 2\Delta(r/a)^\alpha]^{1/2}$$

für $r \leq a$

wobei n_c der Index im Mittelpunkt des Kerns, n_0 der Index des Kerns bei $r=a$ (am Aussenmantel des Kerns) und $\Delta = (n_c^2 - n_0^2) / 2n_c^2$ und a der Kernradius ist.

Man nahm an, dass das parabolische Indexprofil mit $\alpha=2$ die auf Unterschieden der Gruppengeschwindigkeiten der Moden beruhende Dispersion minimieren würde.

In der genannten Veröffentlichung von D. Gloge et al. ist eine weitere Entwicklung beschrieben, wonach eine Verminderung der Pulsdispersion erreicht werden soll, wenn $\alpha = 2 - 2\Delta$ ist, statt $\alpha=2$.

Diese Theorien, wonach $\alpha=2$ oder $\alpha=2-2\Delta$ sein soll, vernachlässigen jedoch Einflüsse aufgrund von Dispersionsunterschieden zwischen Kern und Mantel.

Die US-PS 3 904 268 der Anmelderin beschreibt eine Gradientenfaser, bei welcher die vorgenannte Dispersion reduziert ist. Und zwar wird danach eine minimale Verzögerungsdifferenz zwischen den Moden erreicht, wenn das Indexprofil bestimmt ist durch die Gleichung

$$n^2(r) = n_c^2 [1 - 2\Delta(r/a)^\alpha] \quad r \leq a$$

wobei

$$\alpha = 2 - \frac{2n_c}{N_c} \cdot \frac{\lambda_0 d\Delta / d\lambda_0}{\Delta} - \frac{12\Delta}{5}$$

wobei n_c = Index am Mittelpunkt, n_0 = Index bei $r=a$, $\Delta = (n_c^2 - n_0^2) / 2n_c^2$ und $N_c = n_c - \lambda_0 dn_c / d\lambda_0$.

Die Lehre dieser US-PS 3 904 268 gilt unabhängig von der Glaszusammensetzung, sofern nur der Index des Kernes

innerhalb der Bandbreite der Lichtquelle obiger Gleichung genügt. Die Lehre gilt für alle Zwei- oder Mehrkomponenten-gläsern.

In dem Aufsatz «Profile Synthesis in Multicomponent Glass Optical Fibers» von Kaminow und Presby, in der Zeitschrift «Applied Optics» vom 16. Januar 1977, und in der US-PS 4 025 156 von Gloge und Presby ist gezeigt, dass durch richtige Auswahl der Glaszusammensetzung die Dispersion eines Wellenleiters minimiert werden kann – über einen Wellenlängenbereich oder bei zwei oder mehr bestimmten Wellenlängen.

In der US-PS 4 033 667 von Fleming, welche der Lehre von Kaminow, Presby und Gloge verwandt ist, ist gezeigt, wie bzw. dass eine bestimmte Glaskomposition einer Faser über einen ganzen Wellenlängenbereich ein gleichbleibendes Indexprofil haben kann. Die zitierten Literaturstellen, nämlich der Artikel von Kaminow-Presby, das Patent von Gloge und Presby und das Fleming-Patent beziehen sich immer nur auf eine bestimmte Glaskomposition. Nach Fig. 1 in dem Aufsatz von Kaminow-Presby muss die Konzentration von P_2O_5 bei $r=0$ 11,5mal grösser sein als die GeO_2 -Konzentration bei $r=a$, um eine verminderte Pulsdispersion über einen grösseren Wellenlängenbereich zu erhalten. Diese Glaskomposition ist zwar günstig bezüglich der Dispersion, jedoch ungünstig bezüglich der Viskosität, der thermischen Expansion, der chemischen Beständigkeit und der numerischen Apertur.

Die gleichen Beschränkungen gelten für die Glaskompositionen nach Gloge und Presby. Danach soll die GeO_2 -Konzentration bei $r=0$ 8mal kleiner als die B_2O_3 -Konzentration bei $r=a$ sein. Diese Beschränkung schliesst eine Glaskomposition mit anderen wichtigen Eigenschaften wie hoher numerischer Apertur, guter thermischer Expansion und Viskosität über den Querschnitt der Faser aus.

Die Wellenlängen-Abhängigkeit der Pulsdispersion optischer Fasern ist ziemlich bedeutsam. Ein Wellenleiter mit geringer Pulsdispersion bei einer Reihe verschiedener Wellenlängen oder über einen ganzen Wellenlängenbereich ist einem Wellenleiter überlegen, der nur bei einer einzigen Wellenlänge geringere Dispersion ergibt. Die Faser gemäss US-PS 3 904 268 zeigt ein Minimum der Dispersion bei nur einer einzigen Wellenlänge. Allerdings kann man durch entsprechende Auswahl des Kompositionsprofils gemäss der US-PS 3 904 268 für jede beliebige Wellenlänge eine Faser erhalten, die bei dieser Wellenlänge minimale Dispersion zeigt. Bei anderen Wellenlängen ist die Dispersion jedoch bedeutend grösser (vgl. Fig. 4).

Demgegenüber liegt vorliegender Erfindung die Aufgabe zugrunde, diese schwerwiegenden Beschränkungen in der Glaskomposition (gemäss US-Patent 4 025 156, Gloge und Presby) zu vermeiden und auch über die Lehre gemäss US-PS 3 904 268 hinauszugehen; es soll also eine Gradientenindexfaser angegeben werden, die über einen ganzen Wellenlängenbereich oder wenigstens bei zwei oder mehr bestimmten Wellenlängen geringe Dispersion aufweist und die kleinen bzw. praktisch keinen Beschränkungen in ihrer Glaskomposition unterliegt, sondern aus einem grossen Bereich möglicher Glaskompositionen herstellbar ist.

Die Lösung dieser Aufgabe ist in den Patentansprüchen 1 und 2 angegeben.

Die Nützlichkeit der Erfindung wird besonders sinnfällig in Anbetracht der grossen Kosten der Installation von Lichtleiterkabeln; die Kosten der optischen Fasern selbst sind dagegen relativ gering. Die gegenwärtig benutzten Quellen oder Geber von Lichtpulsen arbeiten bei Wellenlängen von ungefähr 0,85 Mikron. Die installierten Kabel sollen also bei dieser Wellenlänge minimale Pulsdispersion haben. In Zukunft könnten aber Pulsgeber entwickelt werden, die auf anderen Wellenlängen arbeiten. Es wäre also sehr vorteilhaft,

wenn die installierten Kabel auch bei diesen anderen Wellenlängen minimale Pulsdispersion aufweisen würden – also über einen grossen Wellenlängenbereich oder jedenfalls bei vielen bestimmten Wellenlängen minimale Pulsdispersion haben; die installierten Kabel könnten dann mit den besseren Pulsgebern anderer Wellenlänge als der ursprünglich vorgesehenen betrieben werden. Die Kosten für die Installation entsprechender neuer Kabel könnten dann eingespart werden.

Im einzelnen wird die Erfindung nachstehend anhand der Zeichnung beschrieben, wobei weitere wichtige Aspekte und Vorteile erläutert werden.

Fig. 1 zeigt eine Schrägansicht auf das Ende einer optischen Faser – stark vergrössert.

Fig. 2 zeigt – stark vereinfacht – ein Blockschaltbild eines Kommunikationssystems, in welchem zur Signalübertragung die Faser nach Fig. 1 vorgesehen ist.

Fig. 3 veranschaulicht ein Verfahren zur Herstellung einer solchen Glasfaser.

Fig. 4 bis 7 zeigen verschiedene Diagramme: In

Fig. 4 ist die Puls-Dispersion über der Wellenlänge aufgetragen, wobei die Kurve C1 für eine herkömmliche Glasfaser gilt und die Kurve C2 die bedeutend verminderte Pulsdispersion einer erfindungsgemässen Faser zeigt. In

Fig. 5 zeigt Kurve A0 die Abhängigkeit des optimalen α -Wertes von der Wellenlänge, für ein einfaches α -Profil, die Kurven A1 und A2 zeigen

$\alpha_1(\lambda)$ und $\alpha_2(\lambda)$

für eine bevorzugte Ausführung der Erfindung, wobei jeweils bei der Wellenlänge 0,85 μm ein Extremwert vorliegt. In

Fig. 6 zeigen die Kurven B1 und G1, die B_2O_3 - bzw. GeO_2 -Konzentrationsprofile (in Abhängigkeit vom Mittelpunkt Abstand) für ein einfaches α -Profil, für minimale Dispersion bei $\lambda=0,85 \mu m$.

Die Kurven B2 und G2 zeigen das B_2O_3 - bzw. GeO_2 -Profil – bevorzugtes Ausführungsbeispiel – für ein Doppel- α -Profil für $d\alpha/d\lambda=0$ bei $\lambda=0,85 \mu m$.

Fig. 7 zeigt die Pulsdispersion über der Wellenlänge für ein bevorzugtes Ausführungsbeispiel der Erfindung, wobei die Pulsdispersion bei zwei bestimmten Wellenlängen ein Minimum annimmt.

Der optische Wellenleiter 11 (nachfolgend weiterhin «Faser» oder «Glasfaser» genannt) hat einen Kern 12 und einen Mantel 13. Der Index des Mantels 13 ist kleiner als der des Kerns 12. Der Kern 12 hat ein Gradienten-Indexprofil, der Index variiert gesetzmässig von n_c im Mittelpunkt zu n_0 beim Radius a , also am Umfang des Kerns. Der Indexgradient ist bestimmt durch wenigstens zwei das Indexprofil bestimmende Begriffe oder Grössen, wodurch die Pulsdispersion über einen Wellenlängenbereich oder bei bestimmten Wellenlängen minimiert wird.

Dieser Wellenleiter ist eingefügt in ein optisches Kommunikationssystem mit einem Sender 15 für eine mittlere Wellenlänge λ und einen Empfänger 14 (Fig. 2). Die Pulsdispersion zwischen Sender und Empfänger soll minimiert werden, und zwar möglichst über einen ganzen Wellenlängenbereich oder bei mehreren bestimmten Wellenlängen.

Entsprechend der Erfindung weist der Kern 11 mehrere Glaskomponenten auf, wie Germaniumsilikat und Borsilikat. Die Konzentration dieser binären Komponenten variiert über den Radius nach einem bestimmten Konzentrationsprofil. Bei Benutzung dieser Komponenten bedeutet n_c den Brechungsindex (des Germaniumsilikatglases) bei $r=0$ und n_0 den Brechungsindex (des Borsilikatglases) bei $r=a$.

Die Pulsdispersion eines aus solchem Multi-Komponenten-Glas fabrizierten Wellenleiters ist minimiert, wenn der Index des Kern in Abhängigkeit vom Mittelpunkt Abstand bestimmt ist durch:

$$(1) \quad n^2(r) = n_c^2 \left[1 - \sum_{i=1}^N 2\Delta_i (r/a)^{\alpha_i} \right]$$

wobei α_i definiert ist durch:

$$(2) \quad \alpha_i = 2 - \frac{2n_c}{N_c} \frac{\lambda}{\Delta_i} \frac{d\Delta_i}{d\lambda} - \frac{12}{5} \Delta_i \quad i = 1 \dots N$$

wobei $N \geq 2$

$$(3) \quad n^2(r) = N_c^2 [1 - F(r)] \quad r \leq a$$

$$\text{und} \quad N_c = n_c - \lambda \frac{dn_c}{d\lambda}$$

$$(4) \quad F(r) = \sum_{i=1}^N 2\Delta_i (r/a)^{\alpha_i} \quad r \leq a$$

$$\text{und} \quad \Delta = (n_c^2 - n_0^2) / 2n_c^2$$

wobei N eine positive, ganze Zahl ist. Gemäss US-PS 3 904 268 ist N gleich 1, während in vorliegender Anmeldung N gleich oder grösser als 2 ist. Mercatili zeigt, dass die Verzögerungszeit der Moden μ und ν gegeben ist durch

$$\text{und} \quad \Delta = \sum_{i=1}^N \Delta_i$$

$$(5) \quad \tau_{\mu\nu} = T(1 - B_{\mu\nu}/D) / (1 - B_{\mu\nu})^{1/2}$$

wobei

$$(6) \quad T = L N_c / C$$

$$(7) \quad N_c = n_c - \lambda \frac{dn_c}{d\lambda}$$

$$(8) \quad D = (1 + \frac{r}{2F} \frac{\partial F}{\partial r}) / (1 - \frac{1}{2} \frac{n_c}{N_c} \frac{\lambda \partial F}{F \partial \lambda})$$

$$(9) \quad B_{\mu\nu} = (k^2 n_c^2 - \beta_{\mu\nu}^2) / (k^2 n_c^2)$$

wobei $k = 2\pi/\lambda$, L die Faserlänge und C die Lichtgeschwindigkeit ist.

Da $B_{\mu\nu}$ klein ist in der Grössenordnung von

$$\Delta = \sum_{i=1}^N \Delta_i$$

bis zur Grösse des Δ^2 , so gilt

$$(10) \quad \tau_{\mu\nu} = T[1 - B_{\mu\nu}/D + B_{\mu\nu}/2 + (3/8 - \frac{1}{2D}) B_{\mu\nu}^2]$$

Wenn $D = 2 - 6/5\Delta$, so ist der quadratische Mittelwert der zeitlichen Differenzen zwischen den Moden für $N=1$ minimiert, entsprechend der US-PS 3 904 268 und ist ebenso reduziert für $N \geq 2$ entsprechend vorliegender Erfindung.

Die Gleichung (8) kann als partielle Differentialgleichung geschrieben werden wie folgt:

$$(11) \quad r \frac{\partial F}{\partial r} + \frac{dn_c}{N_c} \lambda \frac{\partial F}{\partial \lambda} + 2(1-D)F = 0.$$

Für die in US-PS 3 904 268 ($N=1$) beschriebene Klasse von Profilen hat die Gleichung (11) die Lösung:

$$(12) \quad \alpha = 2 - \frac{2n_c}{n_c} \frac{\lambda}{\Delta} \frac{d\Delta}{d\lambda} - \frac{12}{5} \Delta.$$

Für die Profile nach den allgemeineren Gleichungen (3) und (4) sind neue Lösungen für die Gleichung (11) gefunden worden, wenn

$$(13) \quad \alpha_i = 2 - \frac{2n_c}{n_c} \frac{\lambda}{\Delta_i} \frac{d\Delta_i}{d\lambda} - \frac{12}{5} \Delta_i; \quad i = 1 \dots N.$$

Die Pulsdispersion von Multikomponentenfaser ist also ebenfalls minimiert bei einem Indexprofil gemäss Gleichungen (1) und (2).

In vorstehender Analyse ist der in dem US-Patent 3 904 268 von Keck und Olshansky gegebene Ausdruck $\Delta(4+y) \cdot (3+y)/(5+2y)$ vereinfacht worden zu $12/5\Delta$. Es ist also angenommen worden, dass $|y| < 1$; diese Annahme ist zumindest für die meisten Fälle gültig.

Man kann eine minimale Dispersion über einen grossen Wellenlängenbereich erhalten – und zwar für ein optimales Indexprofil, wenn:

$$(14) \quad \left. \frac{d\alpha_i}{d\lambda} \right|_{\lambda=\lambda_0} = 0 \quad \text{für} \quad i = 1 \dots N.$$

Wenn die Werte von α_i Ableitungen bei Null haben (zero derivative), so erhält man minimale Pulsdispersion über ein breiteres Band von Wellenlängen.

Eine Alternative Bedingung, die für bestimmte Anwendungsfälle erwünscht ist, besteht darin, dass man minimale Dispersion bei zwei (oder mehr) verschiedenen Wellenlängen erhält, wenn

$$(15) \quad \alpha_i(\lambda_1) = \alpha_i(\lambda_2) \quad i = 1 \dots N.$$

Beispiel 1

Eine Multimodenfaser sei im Zentrum mit 7,9 mol-% GeO_2 und am Aussenumfang ($r=a$) mit 13,5 mol-% B_2O_3 dotiert.

Messungen des Brechungsindex des Germaniumsilikatglases sind zu finden in dem Werk von S. Kobayashi, S. Shibata und N. Shibata, T. Izawa, erschienen im Digest 1977 über die «International Conference on Integrated Optics and Optical Fiber Communications» in Tokyo, Japan. Die Indizes des Borsilikatglases sind angegeben worden von J.W. Fleming in dem «Journal of the American Ceramic Society» 59, 503–507 (1976).

Die oben erwähnten Brechungsindizes wurden an der rohen Glasmasse gemessen. Die Indizes einer optischen Faser können aber davon wesentlich abweichen wegen des bekannten Abschreckungseffekts (quenching effects) beim Ziehen. In vorliegender Anmeldung sind aber stets die Indizes der wirklichen Faser gemeint. Nur zur Illustration der Erfindung wird auf Messungen von Indizes der rohen Glasmasse verwiesen. Bei Anwendung von Sellmeier-Fits findet man für eine Wellenlänge $\lambda = 0,85$ Mykron, $n_c = 1,46493$, $n_0 = 1,45071$ und $\Delta = 0,00966$.

Bei Anwendung des Einfachprofils nach US-PS 3 904 268 zum Minimieren der Pulsdispersion bei $\lambda = 0,85$ Mykron, findet man den α -Wert gleich 1,957. Der quadratische Mittelwert der Pulsverbreiterung in Nanosekunden/Kilometer (ns/km) für diesen Wellenleiter ist als Kurve C1 in Abhängigkeit von λ

in Fig. 4 gezeigt. Es zeigt sich ein Minimum von 0,013 ns/km bei $\lambda = 0,85$ μm .

Gemäss einer möglichen Ausführung der Erfindung werden Δ_1 und Δ_2 wie folgt gewählt:

$$\Delta_1 = (n_c^2 - n_s^2) / 2n_c^2$$

$$\Delta_2 = (n_s^2 - n_o^2) / 2n_c^2$$

wobei n_s der Brechungsindex von Quarzschmelze (fused silica) ist. n_s kann errechnet werden aus dem Sellmeier-Fit nach dem Werk von I.H. Malitson in «Journal of the Optical Society of America», 55, 1205 (1965). Bei 0,85 μm ist n_s gleich 1,45250. Für dieses Beispiel ist Δ_1 gleich 0,00845 und Δ_2 gleich 0,00121. Wieder gemäss Sellmeier erhält man die Werte:

$$\lambda \frac{dn_c}{d\lambda} = -.01397; \quad \lambda \frac{d\Delta_1}{d\lambda} = -.423 \times 10^{-3},$$

$$\text{und} \quad \lambda \frac{d\Delta_2}{d\lambda} = +.522 \times 10^{-3}$$

eingesetzt in die Gleichung (2) erhält man die Werte $\alpha_1 = 2,076$ und $\alpha_2 = 1,121$, wobei die Pulsdispersion bei etwa 0,85 μm minimiert ist.

Nach Bestimmung der α_i -Werte wird das Indexprofil des Kerns bestimmt gemäss Gleichung (1). Eine Faser entsprechend Gleichung (1) kann dann hergestellt werden nach dem Verfahren beispielsweise gemäss US-PSen 3 823 995 und 3 826 560.

Im allgemeinen, wenn der Brechungsindex sich linear mit der Konzentration des Dopungsmittels ändert, entsprechen die Konzentrationsprofile $C_j(r)$ eines Glases mit P Bestandteilen im wesentlichen folgender Gesetzmässigkeit:

$$C_j(r) = C_{j0} + \sum_{i=1}^N C_{ji} (r/a)^{\alpha_i}$$

$$j = 1 \dots p, \quad i = 1, \dots, N, \quad p \geq 3, \quad N \geq 2,$$

wobei die Koeffizienten C_{ji} und die α_i -Werte so gewählt werden, dass sich eine verminderte Pulsdispersion gemäss den hier diskutierten Betrachtungen ergibt, und wobei die Konzentrationen ausgedrückt sind entweder als Mol-Anteile, Gewichtsanteile, Atomgewichtsanteile oder in irgendeinem anderen Mass für die Konzentration.

Unabhängig vom Herstellungsverfahren ist es unwahrscheinlich, dass eine Ware mit gestuftem Indexprofil erhalten wird, wobei α genau dem vorbestimmten Wert entspricht.

Man kann jedoch Fasern machen, deren Indexprofil angenähert dem optimalen Profil nach Gleichungen (1) und (2) entspricht, und dabei eine wesentliche Verminderung der Pulsdispersion erreichen. Diese Techniken entsprechen der Fabrikation von Multikomponent-Wellenleitern gemäss Fig. 3, was weiter unten beschrieben wird.

In den folgenden (Unter-)Beispielen 2 und 3 ist gezeigt, wie bevorzugte Ausführungen gemäss Gleichung (14) oder (15) herstellbar sind. Der Einfachheit halber sei angenommen, dass die Zahl des α -Indexprofils nach Gleichung (1) gleich 2 ist, d.h. $N=2$.

In diesen Beispielen bestimmen wir zwei Grössen, welche die Änderung des Brechungsindex von Quarzglas durch Germanium und die Änderung durch Boroxid angeben. Diese Grössen sind:

$$(16a) \quad \delta_G = n_c^2 - n_s^2$$

$$(16b) \quad \delta_B = n_s^2 - n_0^2$$

wobei n_s der Brechungsindex von synthetischen Kieselsäureglas (fused silica) ist. Die beiden Grössen δ_G und δ_B entsprechen den Grössen Δ_1 und Δ_2 im vorhergehenden Beispiel. Es werden noch folgende Begriffe definiert:

$$(17a) \quad \delta_i = \lambda \frac{d\delta_i}{d\lambda} \quad i = G, B$$

$$(17b) \quad \delta_{ii} = \lambda \frac{d^2\delta_i}{d\lambda^2} \quad i = G, B.$$

Der Brechungsindex n_s von synthetischem Kieselsäureglas (fused silica) kann nach Sellmeier bestimmt werden gemäss I.H. Malitson, J. Opt. Soc. Amer. 55, 1205 (1965). In diesem Beispiel ist n_s wieder der Brechungsindex von «fused silica» dotiert (gedopt) mit 7,9 mol-% GeO_2 , und n_0 der Index von «fused silica» dotiert (gedopt) mit 13,5 mol-% B_2O_3 . Drei weitere Grössen werden definiert:

$$(18) \quad Z = \frac{\lambda}{n_c^2} \frac{dn_c^2}{d\lambda}$$

$$(23a) \quad (1-X_G)^2 A_{GG} + (1-X_G)X_B A_{BG} + X_B^2 A_{BB} = 0$$

$$(23b) \quad (1-X_B)^2 A_{BB} + (1-X_B)X_G A_{BG} + X_G^2 A_{GG} = 0$$

Hierbei sind die A-Werte durch die Indizes des betreffenden Glases bestimmt. Gleichungen (23a) und (23b) können in allgemeinerer Form ausgedrückt werden wie folgt:

$$(24) \quad (1-X_i)^2 A_{ii} + (1-X_i)X_j A_{ij} + X_j^2 A_{jj} = 0$$

$$(19) \quad W = \frac{\lambda}{n_c^2} \frac{d}{d\lambda} \left(\lambda \frac{dn_c^2}{d\lambda} \right)$$

$$(20) \quad V = (Z^2 - W) / (2 - Z).$$

Um die Wirkung der beiden Dopungsmittel auf Δ_1 und Δ_2 aufzuteilen, wird definiert:

$$(21a) \quad \Delta_1 = [\delta_G(1-X_G) + \delta_B X_B] / (2n_c^2)$$

$$(21b) \quad \Delta_2 = [\delta_G X_G + (1-X_B)\delta_B] / (2n_c^2)$$

X_G ist ein Mass für den Betrag von Germanium, der Δ_2 zugeordnet ist. Wenn X_G gleich 1 ist, so ist das gesamte Germanium Δ_2 zugeordnet. X_B ist ein Mass für den Betrag an Boroxid, der Δ_1 zugeordnet ist.

Gleichungen (21a-b) entsprechend der geforderten Bedingung nach

$$(22) \quad \Delta = (\Delta_1 + \Delta_2).$$

In Gleichungen (21a-b) werden die Beträge X_G und X_B eingeführt, um Δ_1 und Δ_2 zu bestimmen. In vielen Glassystemen ist das Quadrat des Brechungsindex proportional dem Quadrat der Dotierungsmittelkonzentration. In diesem Fall sind also X_G und X_B proportional der Konzentration von GeO_2 und B_2O_3 . Diese Proportionalität ist jedoch nicht notwendig für die Praxis der Erfindung.

Es wird nun gezeigt, dass aufgrund der Gleichungen (16) bis (21) X_G und X_B so bestimmt werden können, dass beide bevorzugte Ausführungen gemäss Gleichungen (14) oder (15) gegeben sind.

Beispiel 2

Die Indexprofile seien gegeben durch Gleichungen (1) und (2). Die Δ_i sind gegeben durch Gleichungen (16) und (21), und die Gleichung (14) ist erfüllt, welche die Bedingungen für minimale Dispersion über einen Wellenlängenbereich ergibt. Dies ist äquivalent mit folgenden Bedingungen:

50

$i=G, j=B$ oder $i=B, j=G$

wobei

$$(25) \quad A_{ij} = \delta_i' \delta_j' - (\delta_i \delta_j'' + \delta_j \delta_i'') / 2 - 2v \delta_i \delta_j \\ V(\delta_i' \delta_j + \delta_j \delta_i') / 2$$

In Gleichung (24) sind kleine Korrekturausdrücke der Ordnung X^3 vernachlässigt worden. 10 Wobei

Die Grössen A_{GG} , A_{BG} , A_{BB} der Gleichung (25) können bestimmt werden durch die erwähnten Sellmeier-Anpassungen der Brechungsindizes.

Gleichung (24) repräsentiert also ein Paar simultaner quadratischer Gleichungen, welche die Parameter X_G und X_B bestimmen. Die Lösungen der Gleichung (24) sind

$$(27) \quad D = (A_{BG}^2 - 4 A_{BB} A_{GG})^{1/2}$$

15 Gemäss der Sellmeier-Anpassung und bei Wahl von $\lambda = 0,85$ Mikron findet man nach diesen Gleichungen die Lösungen:

$$(26a) \quad X_G = \mp [2A_{BB} + A_{BG} \mp D] / (2D) \quad (28) \quad X_G = 0.772 \text{ and } X_B = 1.082.$$

$$(26b) \quad X_B = \mp [2A_{GG} + A_{BG} \mp D] / (2D) \quad \text{Nach Gleichungen (21) und (22) findet man dann}$$

$$(29a) \quad \Delta_1 = 9.04 \times 10^{-3} \text{ und } \Delta_2 = .62 \times 10^{-3}$$

$$(29b) \quad \frac{\lambda d \Delta_1}{d \lambda} = 7.60 \times 10^{-4} \text{ und } \frac{\lambda d \Delta_2}{d \lambda} = -6.61 \times 10^{-4}$$

Gleichung (2) gibt dann das gewünschte Resultat:

$$(30) \quad \alpha_1 = 1.810 \text{ und } \alpha_2 = 4.088.$$

Das Indexprofil nach Gleichungen (29) und (30) wird erhalten, wenn die Dotierungskonzentration von Germaniumoxid und Boroxid wie folgt sind:

$$(31a) \quad C_G(r) = .079 [1. - 0.772 (r/a)^{1.810} - 0.228 (r/a)^{4.088}]$$

und

$$(31b) \quad C_B(r) = .135 [2.082 (r/a)^{1.810} - 1.082 (r/a)^{4.088}].$$

Diese Ergebnisse basieren auf der Annahme, dass der Brechungsindex linear mit der Dotierungskonzentration variiert. Für hiervon abweichende Glassysteme ist die Erfindung dennoch anwendbar, indem die nichtlinearen Bedingungen angewendet werden.

Fig. 3 zeigt eine Vorrichtung zur Bildung eines Wellenleiters mit einem Profil nach Gleichungen (30) und (31). Die Vorrichtung wird nun so beschrieben, dass die Art und Weise der Anwendung dieser Erfindung besser verständlich ist. Auf einen sich drehenden Dorn 17 wird eine Lage Glaspartikel 16 durch Flammenhydrolyse mittels Brenner 18 aufgebracht. Brenngas und Sauerstoff oder Luft werden dem Brenner 18 wie üblich zugeführt (Leitung 19), um die Hydrolyseflamme 20 zu erhalten.

Behälter 21, 22, 23 enthalten flüssige Bestandteile 24, 25, 26, welche letztlich den Niederschlag 16 bilden. Ein passendes gasförmiges Medium wie Sauerstoff oder dergleichen wird in die Behälter eingeführt und in Gasform mittels Tauchleitungen 27, 28, 29 durch die Flüssigkeit durchgeführt. Das Trägergas kommt von einer passenden Quelle (nicht gezeigt) in vorbestimmten Mengen mit vorbestimmtem Druck.

Der Gasfluss durch Flüssigkeit 24 in Behälter 21 wird reguliert mittels Ventil 30 über Manometer 31. In ähnlicher Weise werden die Leitungen 28, 29 durch Manometer 34 bzw. 35 und Ventile 32, 33 eingestellt.

Die flüssigen Bestandteile in den Behältern werden durch Heizmittel auf der erforderlichen Temperatur gehalten. Beim Durchperlen des Trägergases wird Flüssigkeit mitgerissen und gelangt in Sammelleitung 36, die an den Brenner angeschlossen ist, die Mischung wird also in die Flamme 20 eingeführt, so dass die Bestandteile zu den Glaspartikeln oxydiert werden. Die Oxide verlassen die Flamme 20 in Richtung auf den Dorn 17. Der Dorn oder das Stabglied 17 wird rotiert und gleichzeitig hin- und zurück quer zur Flamme 20 bewegt (siehe Pfeil). Man erhält somit einen gleichmässigen Niederschlag auf der Flamme. Die Behälter 21 bis 23 enthalten eine glasbildende Reagenz und wenigstens zwei Dotierungsmittel. Behälter 21 enthält SiCl_4 , Behälter 25 GeCl_4 und Behälter 26 BCl_3 .

Die Ventile 30, 32, 33 werden gemäss US-Patent 3 826 560 geregelt, um das Brechungsindexprofil zu erhalten. Ventile 32 und 33 regeln das Dotierungsmittel.

Gemäss vorliegender Erfindung regeln Regelkreise 37, 38 die Konzentration der zwei Dotierungsmittel während der Bildung des Niederschlags 16 bzw. der Vorform. Ein Fühler 39 liefert ein Signal entsprechend dem jeweiligen Radius der Vorform 16. Dieses Signal wird beiden Regelkreisen 37, 38 zugeführt. Das Ausgangssignal der Regelkreise 37 und 38 variiert entsprechend den Gleichungen (31a) und (31b). Im Beispielsfall beträgt der GeO_2 -Gehalt im Zentrum 7,9 mol-% und die B_2O_3 -Konzentration am Mantel ist 13,5 mole-%. Die Regelkreise oder -geräte 37, 38 sind so programmiert, dass die Gehalte an Dotierungsmitteln in der Vorform 16 so sind, dass in der Faser schliesslich die Gleichung (31) erfüllt ist.

Analoge Regelkreise hierfür sind bekannt. In dem Werk «Analog Computation in Engineering Design» von Rogers und Connolly, McGraw-Hill Book Company, Inc. 1960, sind solche Regelungen beschrieben. Vorzugsweise wird der Prozess jedoch durch Mikroprozessor gesteuert. Ein geeigneter Mikroprozessor ist der «Program Logic Controller» der Allen-Bradley Company.

Für den so hergestellten Wellenleiter wurde die Pulsdispersion über der Wellenlänge errechnet und ist in Kurve C2 in Fig. 4 gezeigt. Der Vergleich mit Kurve C1 für ein Einfach- α -Profil zeigt, dass die Pulsdispersion über einen grossen Frequenzbereich minimiert ist.

In Fig. 5 sind die Funktionen $\alpha_1(\lambda)$ und $\alpha_2(\lambda)$ gemäss Gleichung (2) aufgezeichnet, die nach Beispiel 2 bestimmt wurden. Sowohl α_1 (A1 in Fig. 5) wie auch α_2 (A2 in Fig. 5) zeigen einen Extremwert bei 0,85 Mikron – gemäss Gleichung (14). Jedoch zeigt sich in diesem Wellenlängenbereich ein recht grosser Bereich minimaler Pulsdispersion, wie in Fig. 4 gezeigt.

In Fig. 6 sind das GeO_2 - und B_2O_3 -Dotierungs-Profil dieses Beispiels gezeigt durch die Kurven G2 und B2. Vergleichsweise sind in Kurven G1 und B1 die GeO_2 - bzw. B_2O_3 -Dotierungsprofile gezeigt, die ein optimales Einfach- α -Profil ergeben. Diese früheren Konzentrationsprofile nach den Kurven G1 und B1 sind gegeben durch:

$$(32) \quad C_G(r) = .079 [1 - (r/a)^{1.957}]^{40}$$

$$(36) \quad (1-X_i)^2 B_{ii} + (1-X_i) X_j B_{ij} + X_j^2 B_{jj} = 0$$

wobei $j = G$ und $j = B$ oder $j = G$ und $i = B$ ist.

In Gleichung (36) wurde der kleine Korrekturausdruck von X^3 vernachlässigt.

Die Grössen B_{ij} sind definiert als

$$(37) \quad B_{ij} = 2(Z-\bar{Z}) (\delta_i \bar{\delta}_j + \delta_j \bar{\delta}_i) + (2-\bar{Z}) (\bar{\delta}_i \delta_j' + \bar{\delta}_j \delta_i') - (2-Z) (\delta_j \bar{\delta}_i' + \delta_i \bar{\delta}_j').$$

Die Koeffizienten B_{GG} , B_{BB} , B_{GB} können bestimmt werden durch die erwähnten Sellmeier-Fits.

Durch Lösung von Gleichung (36) findet man

$$(38) \quad \begin{aligned} X_G &= .398 \\ X_B &= -2.021 \end{aligned}$$

$$(33) \quad C_R(r) = .135 (r/a)^{1.957}$$

Es ist klar, dass Dotierungsprofile des optimalen Einzel- α -Profils und des Doppel- α -Profils dieser Erfindung verschieden sind. Diese Unterschiede können beobachtet werden mittels Röntgenstrahl-Mikroprobentechnik zur Messung des Dotierungsprofils optischer Fasern oder von deren Vorformen. Eine solche Technik ist beschrieben durch W.T. Kane in dem Aufsatz «Applications of the Elektron Microprobe in Ceramics and Glass Technology», erschienen in «Microprobe Analysis», herausgegeben durch C.A. Andersen, John Wiley & Sohn, Inc. 1973.

Beispiel 3

Als weiteres bevorzugtes Ausführungsbeispiel wird ein Indexprofil bestimmt gemäss Gleichung (15), welches minimale Pulsdispersion bei zwei Wellenlängen, $\lambda_1 = 0,80$ Mikron und $\lambda_2 = 1,20$ Mikron aufweist.

Die Gleichungen (16) bis (22) sollen die Werte angeben für 0,80 Mikron. Ein analoger Satz von Grössen für 1,2 Mikron wird bestimmt und von ersteren unterschieden durch einen Querstrich über der jeweiligen Grösse, z.B.

$$(34) \quad \bar{\delta}_G = \bar{n}_C^2 - \bar{n}_S^2$$

wobei $\bar{n}_C$ und $\bar{n}_S$ bestimmt sind für 1,2 Mikron. Die zu erfüllende Bedingung ist:

$$(35) \quad \begin{aligned} \alpha_1 &= \bar{\alpha}_1 \\ \alpha_2 &= \bar{\alpha}_2. \end{aligned}$$

Aufgrund Gleichung (4) und der Definitionen der Gleichungen (16) bis (22) folgt, dass Gleichung (35) dem folgenden Ausdruck äquivalent ist:

$$(39) \quad \alpha_1 = 3.028$$

$$\alpha_2 = 1.581.$$

In Fig. 7 ist die so erhaltene Pulsdispersion über der Wellenlänge aufgetragen. Die Pulsdispersion zeigt ein Minimum bei 0,80 und 1,20 μm an.

Die Dotierungsprofile dieses Wellenleiters sind gegeben durch:

$$(40) \quad \begin{aligned} C_G(R) &= .079 [1 - .398(r/a)^{3.028} - .602(r/a)^{1.581}] \\ C_B(R) &= .135 [3.021(r/a)^{1.581} - 2.021(r/a)^{3.028}] \end{aligned}$$

Wenn die lineare Annäherung gemäss Gleichung (21) nicht gilt, so wird die Analyse schwieriger. Die Prinzipien der Bestimmung des Wellenleiters bleiben aber die gleichen.

Weitere Verbesserungen bei der Reduzierung der Pulsdispersion können erreicht werden durch Einfügung zusätzlicher Parameter ε_i in Gleichung (13), so dass

$$(41) \quad \alpha_i = 2 - 2 \frac{n_c}{N_c} \frac{\lambda}{\Delta_i} \frac{d\Delta_i}{d\lambda} - \frac{12}{5} \Delta_i \varepsilon_i$$

Die Grössen ε_i können als kleine Parameter betrachtet werden, derart, dass

$$(43) \quad |\varepsilon_i| \leq 2, \quad i = 1 \dots N.$$

Durch Standardanalysemethoden können ε_i -Werte gewählt werden, welche die Dispersion weiter verkleinern. Die exakten ε_i -Werte hängen ab von Δ_j , $d\Delta_j/d\lambda$, λ , n_c , N_c sowie der Aufteilung der optischen Energie oder Intensität über die Moden des Wellenleiters. Jede Auswahl von ε_i nach Gleichung (42) liegt innerhalb vorliegender Erfindung.

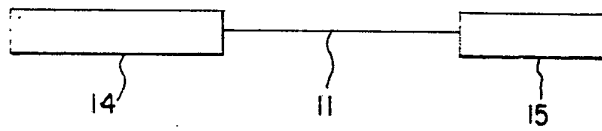


Fig. 2

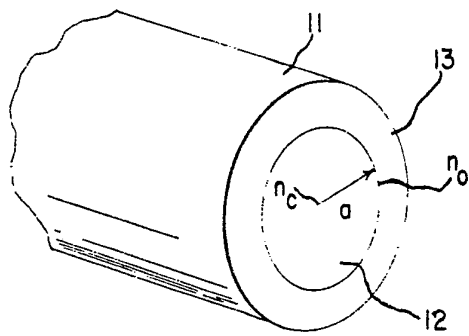


Fig. 1

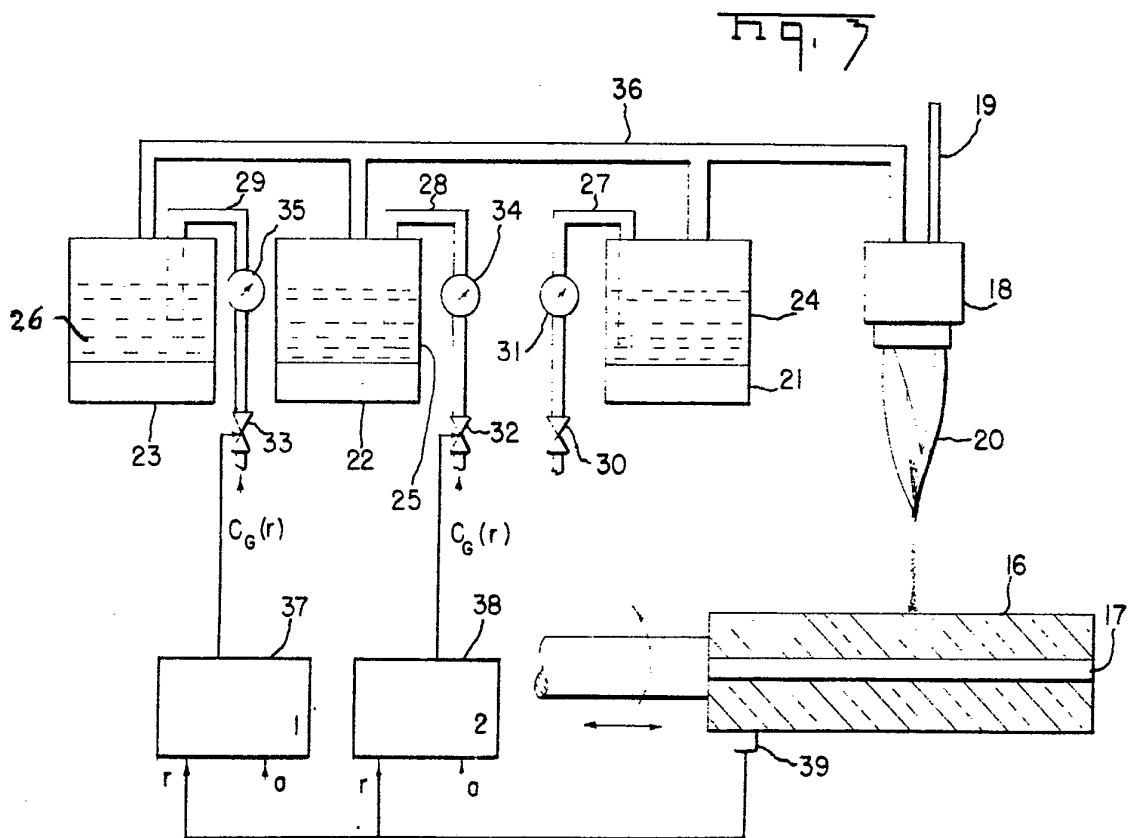
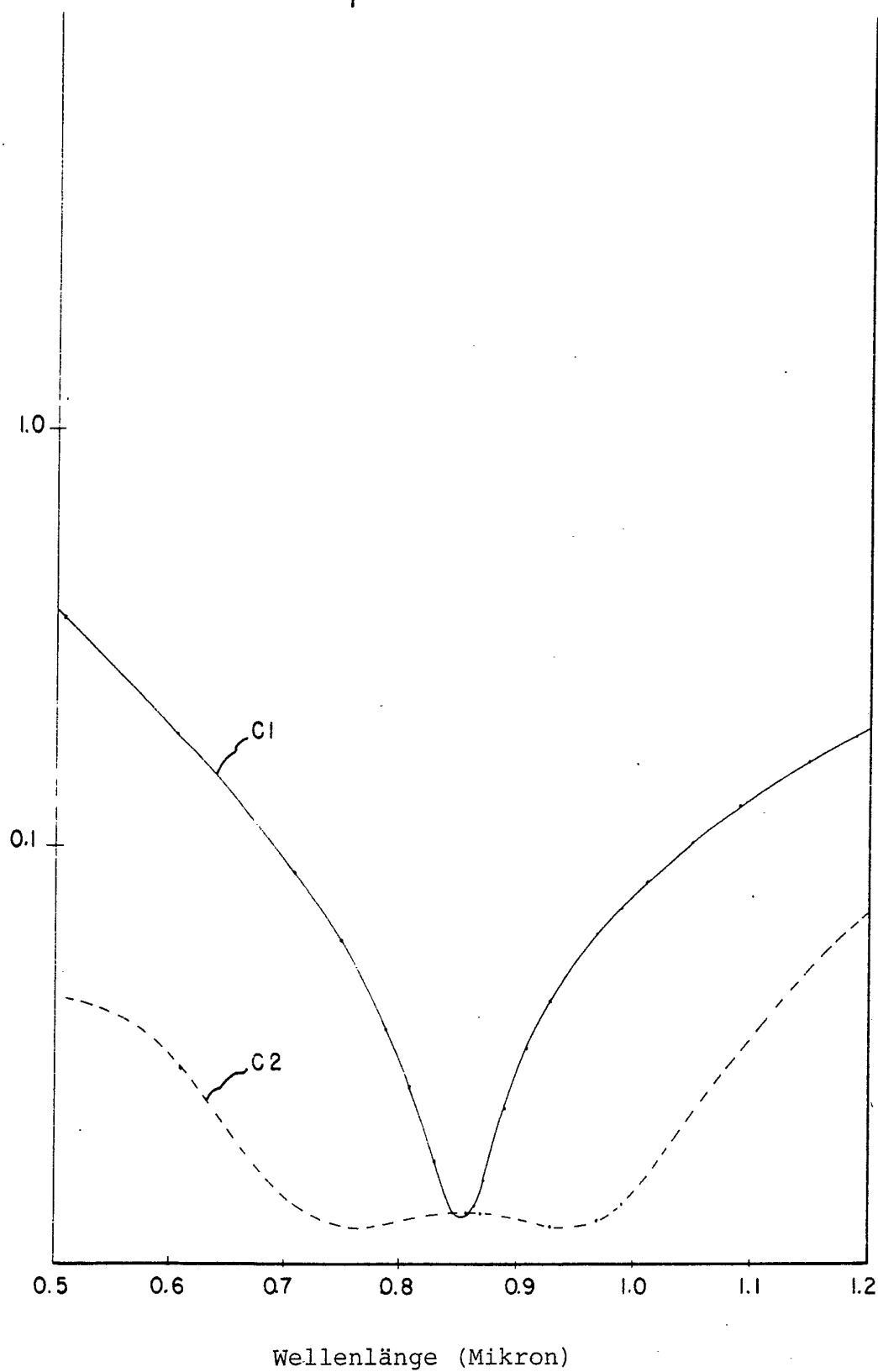


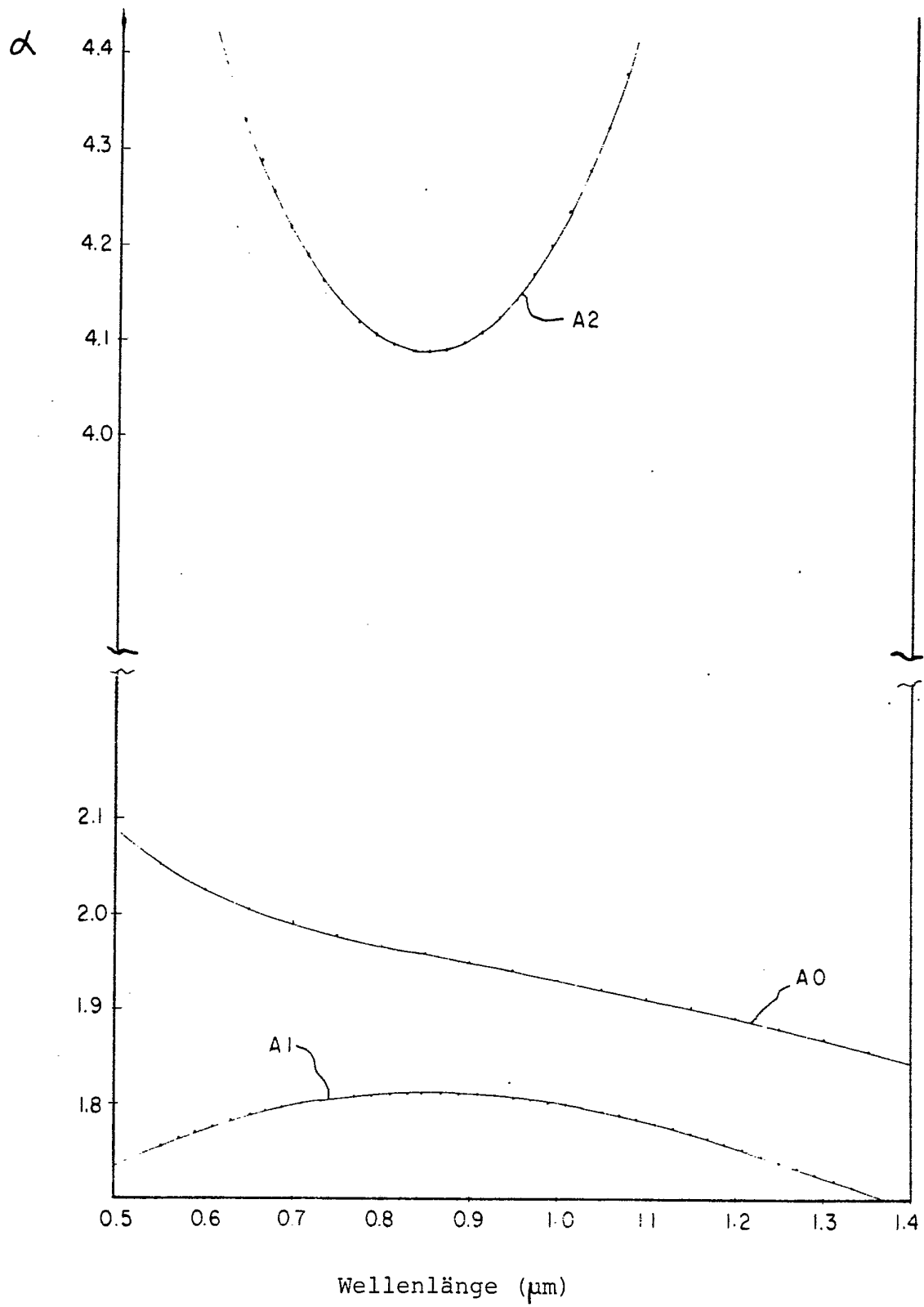
Fig. 3

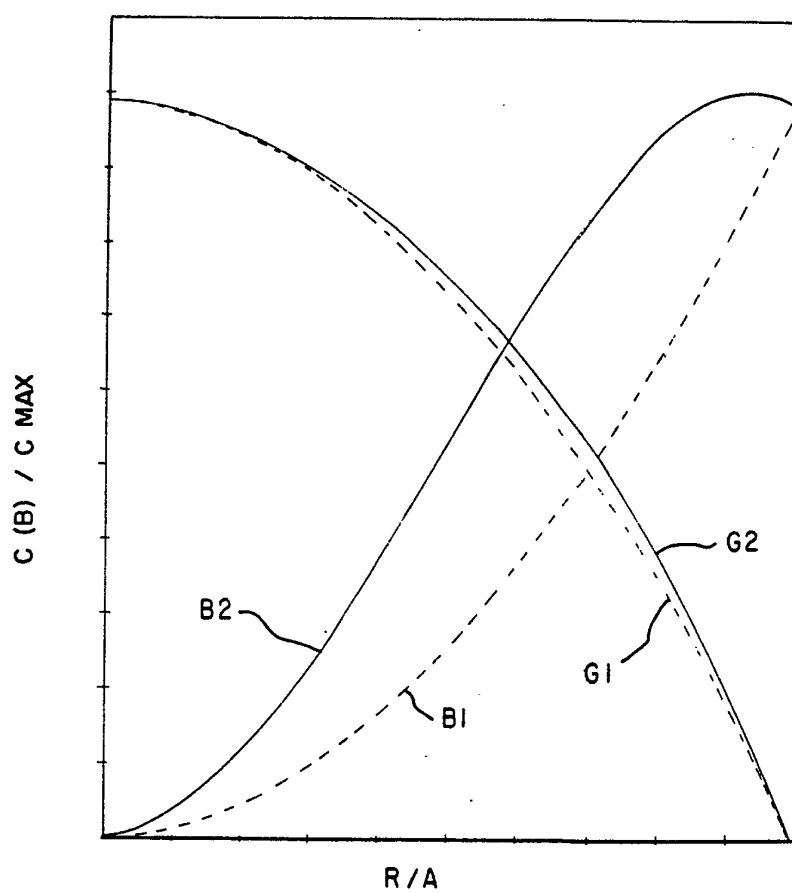
Puls - Dispersion

ns/Km

Hg, 4

Hg. 5



$\overline{Hq, G}$ 

Hq. 7