



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 694 34 788 T2** 2007.08.02

(12) **Übersetzung der europäischen Patentschrift**

(97) **EP 0 626 768 B1**

(51) Int Cl.⁸: **H04B 10/18** (2006.01)

(21) Deutsches Aktenzeichen: **694 34 788.4**

(96) Europäisches Aktenzeichen: **94 303 537.8**

(96) Europäischer Anmeldetag: **18.05.1994**

(97) Erstveröffentlichung durch das EPA: **30.11.1994**

(97) Veröffentlichungstag

der Patenterteilung beim EPA: **12.07.2006**

(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: **02.08.2007**

(30) Unionspriorität:
69952 28.05.1993 US

(84) Benannte Vertragsstaaten:
DE, DK, FR, GB, IT

(73) Patentinhaber:
AT & T Corp., New York, N.Y., US

(72) Erfinder:
**Chraplyvy, Andrew R., Matawan, New Jersey
07747, US; Tkach, Robert William, Little Silver,
New Jersey 07739, US**

(74) Vertreter:
derzeit kein Vertreter bestellt

(54) Bezeichnung: **Lichtwellenleiternetzwerk mit hoher Kapazität und Lichtwellenleiter**

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

Die Übersetzung ist gemäß Artikel II § 3 Abs. 1 IntPatÜG 1991 vom Patentinhaber eingereicht worden. Sie wurde vom Deutschen Patent- und Markenamt inhaltlich nicht geprüft.

Beschreibung

ALLGEMEINER STAND DER TECHNIK

TECHNISCHES GEBIET

[0001] Das hier behandelte Gebiet betrifft Lichtwellenleiternetzwerke mit hoher Kapazität, die mit Wellenlängenmultiplex arbeiten. Die derzeit in Betracht gezogenen Systeme basieren auf Segmentdistanzen von über 100 Kilometern, stützen sich auf Signalverstärkung anstelle von Zwischenverstärkern (Repeater) innerhalb von Segmenten und verwenden drei oder mehr gemultiplexte Kanäle, von denen jeder wenigstens mit 5,0 Gigabit je Sekunde arbeitet.

BESCHREIBUNG DES STANDES DER TECHNIK

[0002] Der Stand der Technik, an dem die vorliegende Erfindung gemessen wird, ist in dem ausgezeichneten Artikel "Dispersion-shifted Fiber", Lightwave, Seiten 25–29, Nov. 1992, zusammengefasst. Wie in jenem Artikel angemerkt, stützen sich die meisten modernen Lichtwellenleitersysteme, die derzeit installiert werden und in den Planungsphasen sind, auf dispersionsverschobene Fasern (DV-Fasern). Eine Anzahl von Entwicklungen hat zu einer Präferenz für eine Trägerwellenlänge von 1,55 μm geführt. Das Verlustminimum für die vorherrschenden Einmodenfasern auf Siliciumdioxidbasis liegt bei dieser Wellenlänge, und der einzige praktikable Faserverstärker zum gegenwärtigen Zeitpunkt – der Erbiumverstärker – arbeitet bei dieser Wellenlänge am besten. Es ist seit einiger Zeit bekannt, dass der lineare Dispersionsnullpunkt – die Strahlungswellenlänge, bei der die chromatische Dispersion das Vorzeichen ändert und durch Null verläuft – im Fall von Fasern auf Siliciumdioxidbasis natürlich bei etwa 1,31 μm liegt. DV-Fasern – das sind Fasern, bei denen der Dispersionsnullpunkt auf 1,55 μm verschoben ist – stützen sich auf einen Ausgleich zwischen den beiden Hauptkomponenten der chromatischen Dispersion: Materialdispersion und Wellenleiterdispersion. Die Wellenleiterdispersion wird eingestellt, indem man das Brechungsindexprofil der Faser speziell anpasst. Davor wurde die Korrektur der Dispersion durch Verketteten von Fasern mit Dispersionen mit entgegengesetztem Vorzeichen vorgeschlagen (siehe ER-A-0.531.210 und FR-A-2.681.745).

[0003] Es wird davon ausgegangen, dass die Verwendung von DV-Fasern zum Mehrkanalbetrieb – dem Wellenlängenmultiplex (WLM) – beiträgt. Dabei definieren mehrere eng beieinanderliegende Trägerwellenlängen einzelne Kanäle, von denen jeder mit einer hohen Kapazität arbeitet, nämlich 5,0 Gbit/s oder höher. Eine Installation, die – sofort oder für ein eventuelles späteres Aufrüsten – für WLM vorgesehen ist, arbeitet mit drei oder mehr Kanälen, wobei jeder nahe genug am Nulldispersionspunkt und jeder mit der gleichen Kapazität arbeitet. Die derzeit in Betracht gezogenen Systeme basieren im Allgemeinen auf vier oder acht WLM-Kanälen, von denen jeder mit dieser Kapazität arbeitet oder auf diese Kapazität aufrüstbar ist.

[0004] WLM-Systeme verwenden, wo es möglich ist, optische Verstärkung anstelle von Signalregenerierung. WLM wird bei Ersetzung des optischen Verstärkers durch den üblichen Zwischenverstärker (Repeater), der sich auf elektronische Detektion und optische Regeneration stützt, praktikabel. Die Verwendung des Er-Verstärkers gestattet Fasersegmente von Hunderten von Kilometern zwischen Zwischenverstärkern (Repeatern) oder Terminals. Ein in der Planungsphase befindliches System verwendet optische Verstärker in Abständen von 120 km über eine Segmentdistanz von 360 km.

[0005] Der angesprochene Artikel befasst sich dann mit der Verwendung von schmalen Spektrallinienbreiten, die von einem Laser mit verteilter optischer Rückkopplung (Distributed Feedback (DFB)-Laser) für Langstreckensysteme mit höchster Kapazität zur Verfügung stehen. Der relativ preisgünstige, weithin erhältliche Fabry-Perot-Laser genügt für den üblichen Erstbetrieb. Wie der Artikel berichtet, basieren Systeme, die derzeit durch Telefonos de Mexico, MCI und AT&T installiert werden, auf DV-Fasern.

[0006] Eine Anzahl von Studien beschäftigt sich mit nicht-linearen Effekten (siehe "Single-Channel Operation in Very Long Nonlinear Fibers with Optical Amplifiers at Zero Dispersion" von D. Marcuse, J. Lightwave Technology, Band 9, Nr. 3, Seiten 356–361, März 1991, und "Effect of Fiber Nonlinearity on Long-Distance Transmission" von D. Marcuse, A. R. Chraplyvy und R. W. Tkach, J. Lightwave Technology, Band 9, Nr. 1, Seiten 121–128, Januar 1991.) Zu den untersuchten nicht-linearen Effekten gehören die stimulierte Brillouin-Streuung, die Eigenphasen- und die Kreuzphasenmodulation, die Vierphotonenmischung (4PM) und die stimulierte Raman-Streuung. Es ist seit einiger Zeit bekannt, dass eine Korrektur der Probleme der linearen Dispersion nicht die endgültige Lösung ist. Noch höherentwickelte Systeme, die über größere Strecken und mit höheren Kapazitäten arbeiten, würden letztendlich zumindest prinzipiell eine Berücksichtigung auch der nicht-linearen

Effekte erfordern.

[0007] Robert G. Waarts und Mitarbeiter, "Nonlinear Effects in Coherent Multichannel Transmission Through Optical Fibers", Proc. IEEE, Band 78, Nr. 8, Seiten 1344–1367 (August 1990), beschreiben Betriebscharakteristika kohärenter Lichtwellenleitersysteme mit besonderem Schwerpunkt auf Effekten von Nichtlinearitäten, einschließlich der Vierwellenmischung. Sie präsentieren Berechnungen zur Veränderung der Abhängigkeit der Leistung der Wellen, die durch Vierwellenmischung mit Kanalfrequenztrennung in einem kohärenten Dreikanalsystem, das mit $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$ arbeitet, in Fasern mit Dispersionswerten von 3 ps/km-nm, 1 ps/km-nm bzw. 0 ps/km-nm erzeugt wurden.

[0008] Masaharu Ohashi und Mitarbeiter, "Dispersion-Modified Single-Mode Fiber by VRD Method", The Transactions of the IEICE, Band E 73, Nr. 4, Seiten 571–575 (April 1990), besprechen die Herstellung von Fasern mit geringer Dispersion im 1,5 μm - bis 1,6 μm -Wellenlängenbereich mittels des VAD-Verfahrens. Dabei beschäftigen sich die Autoren mit der Abhängigkeit der chromatischen Gesamtdispersion von der Kerngröße und zeigen, dass eine Genauigkeit von $\pm 0,05 \mu\text{m}$ beim Kernradius ausreicht, um zu gewährleisten, dass die Dispersion innerhalb des Bereichs von $\pm 2 \text{ ps/nm-km}$ über den gesamten Wellenlängenbereich hinweg liegt.

Terminologie

[0009] WLM: Wellenlängenmultiplex. Ermöglicht den Mehrkanalbetrieb innerhalb einer einzelnen Faser. Die Kanäle liegen ausreichend dicht beieinander, um gemeinsam durch einen einzelnen optischen Verstärker verstärkt werden zu können. Derzeit hat der vorherrschende optische Verstärker (der Erbium-dotierte Siliciumdioxid-Faserverstärker) eine nutzbare Bandbreite von $\Delta\lambda \approx 10\text{-}20 \text{ nm}$.

[0010] Dispersion – Wird der Begriff allein verwendet, so bezieht er sich auf die chromatische Dispersion: ein linearer Effekt aufgrund wellenlängenabhängiger Geschwindigkeit innerhalb des Trägerspektrums.

[0011] Segment(distanz): Hier ist eine Faserstrecke ohne Zwischenverstärker (Repeater) gemeint. Diese Strecke, die wahrscheinlich optische Verstärker beinhaltet, ist die Entfernung zwischen Stationen, an denen das Signal aus einer elektronischen Form umgewandelt wurde oder in eine elektronische Form umgewandelt wird (üblicherweise die Distanz zwischen nächstgelegenen Signalregeneratoren). Ein solches Segment kann ein gesamtes System definieren oder kann mit einem oder mehreren zusätzlichen Segmenten kombiniert sein.

KURZDARSTELLUNG DER ERFINDUNG

[0012] In den häufigsten Fällen erfordern Neuinstallationen für sofortige oder später in Betracht gezogenen WLM-Lichtwellenleiterkommunikationssysteme Fasern mit einer minimalen Dispersion über im Wesentlichen das gesamte Kommunikationssegment hinweg, wodurch sich die Verwendung von größeren Längenabschnitten von DV-Fasern verbietet. Segmente können aus einheitlichen Fasern mit konstanter Dispersion bestehen, die am besten einen Wert von wenigstens 1,5 ps/nm-km aufweist. Alternativ können Segmente Faserreihen mit unterschiedlicher Dispersion durch "Verkettung" oder "Kompensation" verwenden. Beide enthalten Fasern mit einer Dispersion von über 1,5 ps/nm-km. Bei der Verkettung werden aufeinanderfolgende Faserabschnitte mit positiver und negativer Dispersion von im Allgemeinen gleicher Größenordnung verwendet. Bei der Kompensation werden relativ kurze Längenabschnitte von "dispersionsabgestimmten" Fasern von sehr hoher Dispersion verwendet, um größere Faserabschnitte mit entgegengesetzten Dispersionsvorzeichen zu kompensieren. Obgleich die Nutzung von WLM-Systemen in absehbarer Zukunft einen kleinen vorgegebenen Betrag an chromatischer Dispersion zu tolerieren vermag, gestatten die derzeit in Betracht gezogenen Systeme eine Mittelung auf $\lambda_0 = 1550 \text{ nm}$. Es ist in gewissem Umfang bevorzugt, die Dispersion für einen bestimmten Faserabschnitt im System unter einem gewissen Maximalwert zu halten. Insbesondere bei Systemen mit einer Gesamtkapazität von über 40 Gbit/s bei vier Kanälen oder 80 Gbit/s bei acht Kanälen kann eine spontane Generierung zur Erhöhung des Spektralgehalts, der über denjenigen hinausgeht, der durch den trägergenerierenden Laser erzeugt wurde, zu kapazitätsbegrenzender Dispersion führen. Da die resultierende chromatische Dispersion im Endeffekt nicht-linear ist, ist der anfängliche Impulsgehalt nicht wiedererlangbar. Zu diesem Zweck kann ein maximaler Dispersionswert von 8 ps/nm-km für höher-entwickelte Systeme der Zukunft vorgeschrieben werden.

[0013] Eine erhöhte Signalkapazität ist auf die Auslegung des Faserweges zurückzuführen, die eine Vierphotonenmischung als die Kapazitätsbegrenzung vermeidet. Diese Überlegung ist bestimmend für Systeme mit vier oder mehr Kanälen mit Abständen von 2,5 nm oder weniger, für Segmentdistanzen von wenigstens 300 km, die Verstärkerabstände von mindestens 100 km gestatten. Die Erfindung ist in den Ansprüchen definiert.

[0014] Eine gleichzeitig anhängige Anmeldung, die Priorität aus der europäischen Patentanmeldung EP-A-0.627.639 beansprucht, beansprucht eine Faser mit einem Profil, das eine geringe, aber entscheidende chromatische Dispersion gewährleistet, die zur Verwendung in WLM-Systemen geeignet ist. Ihre Verwendung wird in einer Unterart dieser Erfindung erwogen.

[0015] Ganz allgemein ausgedrückt, spiegelt sich in der Erfindung die Beobachtung wider, dass Vierphotonenmischung ein relevanter Mechanismus ist, der bei der Auslegung von derzeit in Betracht gezogenen WLM-Systemen berücksichtigt werden muss. Eine Anzahl von Faktoren stützen die Annahme, dass die Lehre dieser Erfindung die oben beschriebene Form annehmen wird. Zum einen ist das Verändern der Trägerwellenlänge, beispielsweise auf $\lambda = 1550 \pm 20$ nm, zum Einbringen der erforderlichen Dispersion in DV-Fasern zwar grundsätzlich zweckmäßig, aber nur schwer zu erreichen. Der Erbiumverstärker weist in seinem derzeitigen fortgeschrittenen Entwicklungsstadium eine Betriebsspitze nahe 1550 nm auf. Ein Betrieb, der um 20 nm von dieser Spitze abweicht, senkt den Trägerleistungspegel für einen oder mehrere der Kanäle auf eine unzureichend geringe Größenordnung. Es ist denkbar, dass ein Ersatz für Erbium oder eine sonstige Änderung des Verstärkerdesigns einen solchen Betrieb gestattet. Es ist aber wahrscheinlicher, dass künftige Systeme weiterhin unter Nutzung der gegenwärtigen oder einer fortgeschritteneren Stufe des herkömmlichen Erbiumverstärkers konstruiert werden.

[0016] Die Vierphotonenmischung hängt von den exakten Wellenlängen von erzeugten Trägern ab. Gleichmäßig beabstandete Vierkanalsysteme erfüllen unvermeidlich diese Forderung. Die wahrscheinliche Bedeutung von 4PM ist für ein Dreikanalsystem etwas herabgesetzt, und eine präzise ungleichmäßige Beabstandung selbst in einem Vierkanalsystem kann es im Prinzip ebenso vermeiden. Probleme bei der Verwendung dieser Herangehensweise erfordern Betriebsparameter, die jenseits des derzeitigen Standes der Technik liegen und die in jedem Fall die Kosten weiter erhöhen würden. Eine zuverlässige Stabilisierung zur Wahrung einer solchen Präzision, beispielsweise infolge einer thermischen Drift, ist problematisch.

[0017] Diese alternativen Herangehensweisen werden für neu installierte Systeme vielleicht nicht ernsthaft in Betracht gezogen, können aber für die technische Aufrüstung von im Erdreich verlegten Systemen nützlich sein, besonders für solche, in denen DV-Fasern verlegt wurden.

KURZE BESCHREIBUNG DER ZEICHNUNGEN

[0018] [Fig. 1](#) ist ein Schaubild eines WLM-Systems, das zur Besprechung der verschiedenen erfindungsgemäßen Unterarten herangezogen wird.

[0019] [Fig. 2–Fig. 5](#) sind "Augen"-Diagramme, die – auf die Koordinaten "Leistung" und "Zeit" aufgetragen – den Kontrast zwischen Einsen und Nullen in dem Bitstrom zeigen, wie er durch die verschiedenen Dispersionsformen, einschließlich der linearen Dispersion und 4PM, für ein Vierkanalsystem entsteht. Die grundlegenden Betriebssystemcharakteristika für alle diese Figuren sind die gleichen. Die Unterschiede liegen in den Charakteristika der Fasern.

DETAILLIERTE BESCHREIBUNG Allgemeines

[0020] Es wurde nun herausgefunden, dass der letztendliche Zweck, dem DVF dienen sollen, durch genau die Perfektion zunichte gemacht wird, mit der die chromatische Dispersion eliminiert wird. Die zulässige Dispersionstoleranz von $<3,5$ ps/nm-km über den Wellenlängenbereich $\lambda = 1525\text{--}1575$ nm der DVF-Spezifikations-tabelle ist an sich die Gewähr einer ausreichenden Nichtlinearität, um Probleme beim WLM-Betrieb zu verursachen, selbst bei Systemen, die es in absehbarer Zeit geben wird. Es ist nun festgestellt worden, dass geplante Systeme aufgrund einer Form der Nichtlinearität nicht betriebstauglich sind. Die beschränkende Nichtlinearität – die Vierphotonenmischung (4PM) – ist seit geraumer Zeit bekannt und ist in der Literatur beschrieben (siehe den oben zitierten Artikel mit dem Titel "Effect of Fiber Nonlinearity on Long-Distance Transmission". Meistens ist 4PM nur aus akademischen Interesse betrachtet worden. Der zitierte Artikel ist hinreichend repräsentativ für die Untersuchung von Systemen mit Segmentdistanzen von 7500 km. Vorhandene Systeme (die auf üblichen Segmentdistanzen beruhen, die viel kürzer sind) sowie der fortgesetzte Verkauf und die fortgesetzte Installation von DVF speziell für den WLM-Betrieb stimmen mit dieser Sichtweise überein.

[0021] Es ist möglich, die Beschränkungen, die durch 4PM auferlegt werden, durch ein ausgeklügeltes Schaltkreisdesign zu mindern. Die Beachtung von Kanalabständen und Modulationsformaten kann die fortgesetzte Verwendung von DVF für WLM-Systeme von stark verringerter Leistungsfähigkeit – für begrenzte Kanalanzahlen und für begrenzte Distanzen – ermöglichen. WLM-Systeme, die derzeit in Betracht gezogen wer-

den, sind nicht möglich, aber sie werden es durch die Implementierung dieser Erfindung. Der Austausch von DVF ermöglicht die gewünschte Leistungsfähigkeit beispielsweise des Vierkanalbetriebes, eine Kanalkapazität von wenigstens 5 Gbit/s, Segmentdistanzen ohne Zwischenverstärker (Repeater) von 360 km und mehr und Kanalabstände von 1,0 nm–2,0 nm. Die Systemkonstrukteure werden den Wert der Lehre sofort verstehen und sie in die Praxis umsetzen können.

[0022] Wie an anderer Stelle in dieser Beschreibung können konkrete Größenordnungen der Veranschaulichung dienen oder können so gewählt sein, dass sie sich an praktischen Zielsetzungen der nahen Zukunft orientieren. Beispielsweise berücksichtigen Kanalabstände von 1,0 nm oder mehr eine problemlos erreichbare Frequenzstabilisierung von Sendern und Empfängern. Engere Abstände mit der dadurch möglichen größeren Systemkapazität (wobei die erfindungsgemäße 4PM-Verringerung nutzbringend angewendet wird) sind machbar. Konstruktive Erwägungen haben zu postulierten Abständen von 0,8 nm geführt.

[0023] Die Lehre stützt sich auf das Hintergrundwissen des einschlägig bewanderten Lesers. Genau gesagt, erscheint 4PM als eine schwankende Verstärkung oder ein schwankender Verlust – ein Leistungsabfall – infolge von konstruktiver und destruktiver Interferenz, was Signale verschiedener Kanäle nach sich zieht. 4PM ist keine Rauschquelle. Da der Effekt eine Signalverzerrung ist, wobei die Amplitude einiger Abschnitte ansteigt und einiger Abschnitte abfällt, kann der Effekt zu einem späteren Zeitpunkt nicht mehr beseitigt werden. Da die Größenordnung der 4PM leistungsabhängig ist, kann der Effekt durch Verringern der Anregungsleistung gemindert werden. Für eine bestimmte Fasersegmentlänge kann die Einfügungsdämpfung verringert werden, indem man die Anzahl der Verstärker erhöht, um eine Senkung der angeregten Leistungen zu ermöglichen. Wie unter "Terminologie" definiert, gestattet WLMF die Verwendung von Verstärkern, die jeweils mit einem Leistungspegel arbeiten, der sich für DVF bei derzeit in Betracht gezogenen WLM verbietet. In diesem Zusammenhang besteht der erfinderische Fortschritt in der Ermöglichung von Verstärkerabständen von 120 km oder mehr, wobei ein oder mehrere Verstärker mit einem Anregungsleistungspegel von 2,5 mW/Gbit-s arbeiten.

[0024] Diese Überlegungen beziehen sich auf ein erwartetes Verlustbudget einschließlich Spleißverlusten, Alterungseffekten usw. von 33 dB für den Abstand zwischen den Verstärkern. Andere Überlegungen können zu einem anderen Ergebnis führen. Unterwassersysteme – um ein konkretes Beispiel zu nehmen – können mit deutlich größeren Segmentdistanzen arbeiten als derzeit in Betracht gezogene terrestrische Systeme, was auf die höheren Installations- und Wartungskosten der Regeneratorausrüstung zurückzuführen ist. Dies wiederum führt zu engeren Verstärkerabständen von ≤ 100 km.

[0025] Erfindungsgemäße Systeme erfüllen hochgesteckte Erwartungen der Systemdesigner – Erwartungen, die derzeit mit DVF nicht erfüllbar sind.

[0026] [Fig. 1](#) zeigt ein charakteristisches WLM-System, wie es für Installationen in absehbarer Zukunft in Betracht gezogen wird. Es besteht aus vier Sendern: **10**, **11**, **12**, und **13**, die in einem passiven 4:1-Koppler **14** kombiniert sind. Das kombinierte Signal wird in die Faserübertragungsleitung **15** eingespeist, die mit zwei optischen Verstärkern **16** und **17** versehen ist. Am Empfängerende werden die Vierkanalsignale durch einen Demultiplexer **18** geteilt, woraufhin die getrennten Signale zu den vier Regeneratoren **19**, **20**, **21** und **22** geleitet werden.

[0027] [Fig. 1](#) ist repräsentativ für erfindungsgemäße Systeme, die eine größere Anzahl von Kanälen enthalten können. Derzeit werden 8-Kanal-Systeme in Betracht gezogenen. Längere Systeme können längere Segmentdistanzen oder mehrere Segmente enthalten, so dass die vier Sender der Regenerierung dienen können. Für ein System in der Planungsphase misst die Segmentdistanz 360 km, und die Verstärkerbeabstandung beträgt 120 km. Die Kanalbeabstandung, die Differenz der Trägerwellenlänge, beträgt 200 GHz (oder etwa 1,5 nm). Ein Faserweg kann, wie besprochen, größtenteils aus unveränderlichen Fasern mit fester Dispersion von einem Ende zum anderen bestehen oder kann aus verketteten oder kompensierten Fasern bestehen.

[0028] Beanspruchte WLM-Systeme unterscheiden sich von den derzeit geplanten vor allem in der Art der Faserübertragungsleitung. Frühere Systeme wurden anhand der Prämisse geplant, dass die chromatische Dispersion der maßgebliche Faktor für die Kapazität ist. Es wurde erwartet, dass die Verwendung von dispersionsverschobenen Fasern zur Erreichung des WLM-Ziels führen würde: anfängliche Segmentdistanz von 360 km und vier Kanäle mit jeweils einer Kanalkapazität von 5 Gbit/s. Der entscheidende Gedanke hinter der Erfindung ist, dass eine Form von nicht-linearer Dispersion, die Vierphotonenmischung (4PM), die Erreichung des Vierkanal-Kapazitätsziels von 20 Gbit/s verhindert. Das unmittelbare Ergebnis ist, dass sich die Verwendung von größeren Längenabschnitten von DV-Fasern verbietet. Es wird erwartet, dass neu installierte Systeme nun dispersive Fasern verwenden. Auferlegte Beschränkungen hinsichtlich der chromatischen Dispersion

werden durch Verkettung oder Kompensation wettgemacht.

[0029] Die zwei Herangehensweisen gestatten die Verwendung von Fasern mit hohen Dispersionswerten. Sie gestatten die Verwendung von Fasern mit Dispersionen von 4 ps/nm-km und mehr, gemäß Messung bei $\lambda = 1550$ nm. Beide benötigen exakt vorgeschriebene Faserlängen, um die Dispersion genau auf ein geeignetes Niveau zu kompensieren und zu senken. Die erste, die Verkettung, verwendet aufeinanderfolgende Längenabschnitte "normaler" dispersiver Fasern mit entgegengesetzten Dispersionsvorzeichen. "Normal" meint hier Fasern mit einer Dispersion von maximal jener, die durch die Materialdispersion des Systems erzeugt wird. Bei derzeit verwendeten Fasern sind das maximal ~ 18 ps/nm-km. Diese Herangehensweise wird für Unterwasserinstallationen ernst genommen, ist aber für den terrestrischen Einsatz im Allgemeinen verworfen worden. Sie erfordert präzise Längenabschnittsbestimmungen für jeden Fasertyp vor der Installation. Die zweite, die Kompensation, verwendet relativ kurze Längenabschnitte von Fasern mit hoher Dispersion, um die normalen Fasern zu kompensieren. Es wird davon ausgegangen, dass Kompensationsfasern aufgespult werden, um an Verstärker- oder Terminalpunkten installiert zu werden.

Fig. 2–Fig. 5

[0030] Die "Augen"-Diagramme dieser Figuren verfolgen die Kanalleistung in Abhängigkeit von der Zeit.

[0031] Die Diagramme werden in der Weise erstellt, dass das empfangene Signal in Abhängigkeit von der Zeit aufgetragen wird, die Zeitachse anschließend um ein Bitintervall verschoben wird und das Ganze noch einmal aufgetragen wird. Das Abszissenintervall ist ungefähr 1 Bit lang. Die 64 nun überlagerten Bits definieren wahrscheinlichste (konstruktive und destruktive) Interferenzereignisse aufgrund der Übertragung in den drei Kanälen, die dem konkret aufgetragenen Kanal benachbart sind. Das Augendiagramm zeigt die Schlimmstfallbehinderung gemäß Messung anhand des größten Ordinatenwertes, der keine Spuren aufweist (anhand der vertikalen Abmessung des freien Raums zwischen einer Spitze und Null). Ein System, das nicht übermäßig behindert wird, zeigt eine klare Unterscheidung zwischen "Einsen" und "Nullen" mit einer großen "Augenöffnung" in der Mitte des Diagramms. Als ein nicht-behindertes System gilt eines, das eine "Augenöffnung" von 1,0 hat. Echte Systeme, die mit Öffnungen von $\sim 0,9$ arbeiten, gelten als im Wesentlichen nicht-behindert. Systeme werden für solche Öffnungen konstruiert, so dass deutlich größere Behinderungen teure Designänderungen – im Fall von WLM – verlangen, indem die Verstärker/Kompensationsdistanzen verringert werden und/oder die Verstärkeranregungsleistung verringert wird.

[0032] Die Diagramme zeigen ein 64-Bit-Muster und enthalten sowohl Effekte von (linearer) Dispersion als auch Effekte, die von einem nicht-linearen Brechungsindex herrühren. Wegen der Einheitlichkeit gelten alle Kurven für den dritten Kanal. Die verantwortlichen Faktoren sind vor allem die chromatische Dispersion, 4PM und SPM. Die Betriebsleistungspegel sind ausreichend gering, um andere nicht-lineare Effekte ignorieren zu können. (Nicht-lineare Effekte bei sehr geringem Pegel sind die stimulierte Brillouin-Streuung und die stimulierte Raman-Streuung). Nebenlinien sind die Folge sämtlicher wahrscheinlicher Interaktionen. Die Bedeutung des Diagramms liegt in der "Augenöffnung" – in dem leeren Teilraum zwischen einer Spitze und einer Null.

[0033] [Fig. 2](#) ist das Augendiagramm für ein DVF-Vierkanal-WLM-System mit folgenden Betriebsparametern: 200 GHz (1,5 nm) Kanalbeabstandung, 360 km Segmentdistanz, 120 km Verstärkerbeabstandung und 5 Gbit/s Kapazität je Kanal. Seine Öffnung von 0,560 ist für den Betrieb unzureichend. Aufgrund fehlender Dispersion können Dispersion und SPM ignoriert werden, so dass das Schließen des Auges vollständig auf 4PM zurückzuführen ist.

[0034] [Fig. 3](#) ist das Augendiagramm für ein WLMF-System, das unter den gleichen Bedingungen arbeitet. Seine Augenöffnung von 0,814 stellt einen genügenden Kontrast für den Betrieb dar. Bei dem System dieser Figur wird seine Dispersion von +2 ps/nm-km nicht kompensiert. Die Verwendung von kompensierenden Fasern zur Verringerung seiner Dispersion verbessert den Betrieb weiter, wodurch – obgleich es unter diesen Bedingungen nicht erforderlich ist – eine höhere Kapazität ermöglicht.

[0035] [Fig. 4](#) zeigt – wieder für das gleiche WLM-System – die Verwendung von Fasern mit einer Dispersion von +16 ps/nm-km. Der Dispersionswert ist ausreichend hoch, so dass 4PM unter den Betriebsbedingungen unbedeutend ist. Nebenlinien sind die Folge von Dispersion und SPM. Die Öffnung beträgt 0,414.

[0036] [Fig. 5](#) trägt alle Faktoren von [Fig. 4](#) auf, jedoch mit Kompensation, um die Dispersion an jeder Verstärkerposition (bei 120 km Verstärkerbeabstandung) auf null zu bringen. Eine Kompensation allein aufgrund der (linearen) Dispersion bei gleichzeitig vollständiger Ignorierung von SPM vergrößert die Augenöffnung auf

0,924. Auf der Grundlage dieses Diagramms gibt es keinen Grund zu der Erwartung, dass SPM – wenigstens für eine Kompensation über die 120 km Leitungslänge des Systems – unter den angegebenen Betriebsbedingungen berücksichtigt werden muss.

[0037] Die SPM-induzierte Schließung ist ein nicht-linearer Effekt. Ein Kompensieren über einen größeren Längenabschnitt, beispielsweise durch Anordnen von Kompensationsfasern nur an Terminalstellen des Segments, vergrößert die Schließung aufgrund dieses Effekts um mehr als das Dreifache. Die Diagramme lassen darauf schließen, dass selbst dies lediglich geringe Folgen hätte. Es wird davon ausgegangen, dass eine Präferenz für Fasern von geringerer Dispersion, beispielsweise ≤ 8 ps/nm-km, nur für Systeme mit wesentlich größeren Kompensation-zu-Kompensation-Distanzen oder mit deutlich größerer Kapazität von Belang ist.

I. Die Übertragungsleitung

A) WLM-Fasern

[0038] DV-Fasern erfordern weder Verkettung noch Kompensation, und größtenteils ist dies der Grund dafür, dass ihnen gegenüber den anderen Verfahren der Vorzug gegeben wurde. Es wird erwartet, dass die WLM-Fasern der oben erwähnten gleichzeitig anhängigen Anmeldung die DV-Fasern für in absehbarer Zukunft entstehende Systeme, die keine Einstellung der Dispersion auf Null tolerieren, ersetzen. Diese Fasern mit einer chromatischen Dispersion innerhalb ihres zulässigen Bereichs von 1,5–4 ps/nm-km werden wahrscheinlich für vierkanalige Systeme mit 360 km langen Segmenten und einer Kapazität von 20 Gbit/s verwendet werden. Künftige Systeme mit viel größerer Kapazität und Segmentdistanz können WLM-Faserleitungen verwenden, die kompensiert sind, um die lineare Dispersion weiter zu verringern. Aus Gründen, die in der gleichzeitig eingereichten Anmeldung beschrieben sind, ist das Vorzeichen der Dispersion, die für WLM-Fasern benötigt wird, vorzugsweise positiv (+1,5–4 ps/nm-km). Kompensierende Fasern hätten dementsprechend eine negative Dispersion. Wie in der gleichzeitig eingereichten Anmeldung angemerkt, reichen die Implikationen der erfindungsgemäßen Lehre über den genannten Dispersionsbereich hinaus. Die Spezifikation dieses Bereichs ist im Großen und Ganzen für die hier in Betracht gezogenen Systeme zweckmäßig. Die Verwendung einer geringeren Dispersion – auf 1,0 ps/nm-km und kleiner – gewährleistet weiterhin eine verbesserte Kapazität im Vergleich zur Verwendung von DVF, wenn auch im Vergleich zum angegebenen Bereich ein wenig verringert.

[0039] Obgleich WLMF, wie angemerkt, ohne Entzerrung verwendet werden kann, während viele Systemanforderungen erfüllt werden, kann eine Entzerrung die Kapazität weiter erhöhen. Zusätzlich zu einer möglichen Entzerrung durch Verwendung von Kompensationsfasern bietet sich eine spezifische Form der Verkettung an. Hier würde eine Verkettung WLMF-Längenabschnitte mit entgegengesetzten Dispersionsvorzeichen erfordern, wobei beide Längenabschnitte innerhalb des bevorzugten Dispersionsbereichs von 1,5–4 ps/nm-km liegen.

[0040] Eine Versuchsspezifikationstabelle für WLM-Fasern, die sich zur Verwendung in einem in naher Zukunft installierten System eignen, sieht folgendermaßen aus: WLM Spezifikationstabelle

Dämpfung bei 1550 nm	0,22–0,25 dB/km
Dämpfung bei 1310 nm	0,45–0,50 dB/km
Felddurchmesser	8,4 \pm 0,6 Mikron
Kernexzentrizität	Maximal 0,8 Mikron
Manteldurchmesser	125 \pm 2,0 Mikron
Grenzwellenlänge	<1,30 Mikron (2 m Referenzlänge)
Dispersion	$\geq +2$ ps/nm-km bei 1550 nm
Dispersionsgefälle	max. <0,095 ps/nm ² -km
Makrobiegung	<0,5 dB bei 1550 nm, 1 Windung, 32 mm

	<0,1 dB bei 1550 nm, 100 Windungen, 75 mm
Beschichtungsdurchmesser	250 ±15 Mikron
Grenzwertprüfung	min. 50 kpsi (Grenzwertprüfungs-Überlastpegel sind auf Verlangen erhältlich)
Rollenlänge	2,2, 4,4, 6,4, 8,8, 10,8, 12,6 und 19,2 km

[0041] Die Designüberlegungen erfolgen unter Berücksichtigung der geringen, aber entscheidenden Dispersion, die das Hauptunterscheidungsmerkmal gegenüber DVF ist. Weitere Designkriterien, die unter anderem Makrobiegungsverlust, Felddurchmesser usw. betreffen, stimmen im Allgemeinen mit dem Design von zum Stand der Technik gehörenden Fasern (beispielsweise DVF) überein und können sich im Verlauf des weiteren technischen Fortschritts ändern. AT&T Technical Journal, Band 65, Ausgabe 5, (1986), Seiten 105–121, ist repräsentativ. Die Fasern basieren auf Siliciumdioxid und enthalten einen Germanium-dotierten Kern sowie eine oder mehrere Mantelschichten, die aus Siliciumdioxid bestehen können oder mit Fluor herabdotiert sein können. Die insgesamt 125 µm messende Struktur hat einen Kern mit einem Durchmesser von ungefähr 6 µm. Die Indexspitze hat einen Δn von 0,013–0,015 bezüglich undotiertem Siliciumdioxid. Das übliche Profil ist dreieckig oder trapezförmig, eventuell über einer 20 µm-Plattform mit $\Delta n \approx 0,002$. Die angegebenen WLM-Fasern können mit einer Rolle kompensierender Fasern kompensiert werden. Kompensierende Fasern nach EP-A-0.598.554 eignen sich für diesen Zweck. Veranschaulichende Strukturen haben eine Dispersion von 2 ps/nm-km.

B) Kompensation

[0042] Das Prinzip ist beschrieben worden. Es wird wahrscheinlich die Form eines Hauptabschnitts aus Fasern mit positivem Dispersionsvorzeichen, gefolgt von kompensierenden Fasern mit negativer Dispersion, annehmen. Wie bei den WLM-Fasern können kompensierende Fasern die in EP-A-0.598.554 beschriebene Form haben.

[0043] Die Eigenphasenmodulation – ein nicht-linearer Effekt, der zu einer willkürlichen Erzeugung verschiedener Wellenlängen führt – wurde für gering befunden. Aus den [Fig. 4](#) und [Fig. 5](#) ist zu schlussfolgern, dass die Kompensation einer (linearen) Dispersion bei zweckmäßigen Distanzen (in diesem Fall bei 120 km voneinander beabstandeten Verstärkerpositionen) praktisch SPM als Überlegung ausschaltet. Unter diesen Umständen sind Fasern mit $\lambda_0 = 1310$ nm akzeptabel (ungeachtet der Kosten und Umständlichkeit der Kompensation). Das für die nahe Zukunft vorgesehene WLM-System, auf dem diese Beschreibung basiert (360 km Segmentdistanz, vier Kanäle, 5 Gbit/Kanal), akzeptiert die ~17 ps/nm-km betragende unkorrigierte Materialdispersion von Fasern mit $\lambda_0 = 1310$ nm. Künftige Systeme mit längeren Segmentdistanzen oder mit größerer Kapazität können Fasern mit einer Dispersion von ~8 ps/nm-km verwenden.

[0044] Die Inbetrachtziehung von SPM führt zu einer mehrmaligen Kompensation entlang jedes Segments. Die Anforderungen an das für die nahe Zukunft vorgesehene WLM-System werden durch eine Kompensation der Fasern mit ~17 ps/nm-km an jedem Verstärker (beispielsweise in Abständen von 120 km) erfüllt. Der erfindungsgemäße Fortschritt ist – wie besprochen – für Systeme mit kürzeren Segmenten nützlich. Eine Entzerrung (durch Kompensation oder Verkettung) sollte bei solchen kurzen Längenabschnitten nicht so stattfinden, dass die Wirkung einer kompletten DV-Faser entsteht. Eine Entzerrung bei Distanzen von 1 km verbietet sich aus diesem Grund. Längenabschnitte von weniger als 20 km vermeidet man am besten. Ein praktikables Systemdesign, das aus wirtschaftlichen Gründen nicht-entzerrte Fasern mit einer Länge im zweistelligen Kilometerbereich vorsieht (beispielsweise 50 km oder mehr), sind geeignet.

C) Verkettung

[0045] Die Überlegungen zur Systemleistung sind denen der Kompensation recht ähnlich. Eine Verkettung von Faserabschnitten, die viel kürzer als ungefähr 20 km sind, führt zu einem Leitungsverhalten, das sich dem

von DV-Fasern annähert. Auch hier ist ein zweckmäßiges Design mit nicht-entzerrten Längenabschnitten im zweistelligen Kilometerbereich angemessen. SPM, ein weiterer möglicherweise beschränkender nicht-linearer Effekt, kann bei den in Betracht gezogenen 20 Gbit-Vierkanalsystemen toleriert werden. Geplante technische Aufrüstungen sowie Neuinstallationen mit höherer Kapazität können die bevorzugte maximale Dispersion auf einen Wert von ~8 ps/nm-km bringen.

[0046] Wie die Kompensation bietet auch die Verkettung eine vollständige Beseitigung der durchschnittlichen Dispersion. Derzeit geplante WLM-Systeme brauchen solche Präzision möglicherweise nicht. Es genügt, die Dispersion auf den Wert zu verringern, der in der gezeigten WLM-Faser-Spezifikationstabelle angegeben ist ($\geq 2,0$ ps/nm-km).

[0047] Es wird nicht erwartet, dass die Verkettung für die terrestrischen Systeme der absehbaren Zukunft eine große Rolle spielt. Bei Unterwassersystemen ist sie wahrscheinlicher.

D) Sonstige Überlegungen

[0048] Die Segmentdistanz ist anhand eines derzeit in Betracht gezogenen Systems besprochen worden. Hier sind Segmentdistanzen von bis zu 360 km vorgesehen. Es ist wahrscheinlich, dass ein solches System auch kürzere Segmentabschnitte enthält. Diese Überlegung kann allgemeiner angestellt werden. Die grundlegende Herangehensweise ist für alle WLM-Systeme brauchbar, wenn auch nur hinsichtlich der Ermöglichung von planerischer Freiheit und weniger strengen Designtoleranzen. Ein Vierkanalsystem mit 5 Gbit/s zieht beträchtlichen Nutzen aus der vorliegenden Lehre für Segmentdistanzen von ungefähr 200 km. Die Beziehung zwischen Kapazität und Segmentdistanz ist definiert durch:

$$B^2L \leq 104000/D \quad \text{(Gleichung 1)}$$

wobei:

- B = Bitrate in Gbit/s
- L = Länge in km
- D = durchschnittliche Dispersion in ps/nm-km

[0049] Da sich die Länge als das Quadrat der Bitrate ändert, beträgt die entsprechende Segmentlänge für eine Leitungskapazität von 10 Gbit/s = 50 km. Allgemein ausgedrückt, enthalten Systeme, die auf der vorliegenden Lehre basieren, dann wenigstens ein Fasersegment gemäß Gleichung 1.

II. Der Sender

[0050] Dieses Element sowie der Empfänger und der optische Verstärker sind detailliert in "Fiber Laser Sources and Amplifiers IV", SPIE, Band 1789, Seiten 260–266 (1992), beschrieben. Der Sender besteht aus einem Laser für jeden Kanal. Die Laserausgangssignale werden separat moduliert, und die modulierten Signale werden gemultiplext, um in die Übertragungsleitung eingespeist zu werden.

III. Der Empfänger

[0051] Dieses Element am Ende eines Segments kann am Systemendpunkt liegen oder kann ein Bestandteil eines Signalregenerators sein. Er enthält ein Mittel zum Demultiplexen der Kanäle. Dies erfordert eine Vorrichtung, welche die interessierende Kanalwellenlänge durchlässt, während andere gesperrt werden. Dies kann ein einfacher Teiler sein, der mit Lichtwellenleitern an den Ausgangsanschlüssen kombiniert und auf jeden Kanal abgestimmt ist (siehe das Nagel-Dokument), oder es kann eine Vorrichtung sein, die die Funktionen des Teilens und Filterns in einer einzigen Einheit kombiniert.

IV. Optischer Verstärker

[0052] Dieses Element ist heute ein Erbiumverstärker. Der brauchbare Verstärkungsbereich eines einzelnen Erbiumverstärkers ist $\lambda = 40\text{--}50$ nm. Wenn Verstärker in Reihe geschaltet werden, so wird die effektive Verstärkung schmaler (da die Amplitude innerhalb des "Verstärkungsbereichs" auf jeder Seite der Spitze verringert wird). Die angesprochene Bandbreite von 10–20 nm ist ein vernünftiger Wert für ein Segment mit drei Verstärkern.

V. Sonstige Überlegungen

[0053] Weitere Überlegungen sind größtenteils Standard. Mit wenigen Ausnahmen können WLM-Systeme, die zur Verwendung mit DV-Fasern ausgelegt sind, direkt für die Erfindung genutzt werden. Das Systemdesign steht im Einklang mit Überlegungen, die für den Stand der Technik wie auch für die Erfindung gelten. Die Kanalbeabstandung ist notwendigerweise so, dass sie zu den Kanälen innerhalb der Spitze des optischen Verstärkers passt. Die Segmentdistanzmaxima werden durch Einkopplungsverluste, Anregungsleistung und tolerierbare Impulsspreizung bestimmt. Die Überlegungen können natürlich gemäß den auferlegten Beschränkungen angepasst werden. Beispielsweise setzt die Verwendung von WLM-Fasern ohne Kompensation eine Grenze für das Produkt aus Bitrate und Segmentdistanz. Die Segmentdistanz kann entsprechend der Zweckmäßigkeit gewählt werden, beispielsweise wo eine Kompensation vorhanden ist oder wo ein verketteter Faserabschnitt beginnen soll.

[0054] Geplante WLM-Systeme verwenden externe Modulation, um die Dispersionsverluste zu senken und die spektrale Stabilität der Kanäle zu erhöhen.

Patentansprüche

1. Wellenlängenmultiplex-Lichtwellenleitersystem, mit:
 einem Sender (**10, 11, 12, 13**) zum Erzeugen, Modulieren und Multiplexen von modulierten Kanalträgern zum Einspeisen in eine Sendeleitung, wobei der Sender eine "Systemwellenlänge" in einer Größenordnung innerhalb des Wellenlängenbereichs der Kanalträger aufweist;
 einem Empfänger zum Ausführen von Funktionen einschließlich des Demultiplexens von modulierten Kanalträgern;
 optischen Verstärkern (**16, 17**);
 und einer Sendeleitung (**15**) aus Lichtwellenleitern, die wenigstens ein Lichtwellenleitersegment enthält, das an einem Ende durch einen Sender und am anderen Ende durch einen Empfänger (**18, 19, 20, 21, 22**) gebildet wird, wobei das Segment wenigstens einen optischen Verstärker enthält;
dadurch gekennzeichnet, dass
 der Hauptabschnitt der Lichtwellenleiter, die das Segment bilden, eine chromatische Dispersion mit einem absoluten Wert im Bereich von 1,5–8 ps/nm-km bei der Systemwellenlänge aufweist, wodurch gemultiplexte Kanäle Kapazitäten von mehreren Gigabit je Sekunde haben.
2. System nach Anspruch 1, wobei die Systemwellenlänge etwa 1550 nm beträgt.
3. System nach Anspruch 2, wobei der Hauptabschnitt der Lichtwellenleiter, die das Segment bilden, im Wesentlichen von der gleichen chromatischen Dispersion ist.
4. System nach Anspruch 3, wobei die chromatische Dispersion ≥ 2 ps/nm-km beträgt.
5. System nach Anspruch 2, wobei die durchschnittliche lineare Dispersion der Lichtwellenleiter, die das Segment bilden, durch das Einbinden von wenigstens zwei Lichtwellenleiterabschnitten mit voneinander verschiedenen Dispersionsvorzeichen ausgeglichen wird.
6. System nach Anspruch 5, wobei Lichtwellenleiter des Hauptabschnitts aus Lichtwellenleitern, die das Segment bilden, von einer gleichmäßigen chromatischen Dispersion ≥ 2 ps/nm-km sind und wobei der Ausgleich die Folge des Einbindens von Kompensationslichtwellenleitern ist.
7. System nach Anspruch 2, wobei optische Verstärker aus Erbium-dotiertem Siliciumdioxid bestehen.
8. System nach Anspruch 7, wobei die äußersten Wellenlängen von Kanälen ein Spektrum von ≤ 20 nm bilden.
9. System nach Anspruch 8, das wenigstens vier Kanäle enthält, die um 0,8–4 nm voneinander beabstandet sind.
10. System nach Anspruch 1, wobei ein Lichtwellenleiterabschnitt innerhalb eines Segments einen Wert $\lambda_0 = 1550$ nm aufweist.
11. System nach einem der vorangehenden Ansprüche, wobei der Bereich von 1,5–4 ps/nm-km reicht.

12. Gegenstand, der wenigstens einen Lichtwellenleiter enthält, der sich zur Verwendung in Wellenlängenmultiplexsystemen eignet, wobei der Lichtwellenleiter einen Kern und eine Ummantelung enthält, eine Dämpfung von $\leq 0,25$ dB/km bei 1550 nm aufweist und ein Dispersionsgefälle von weniger als $0,095$ ps/(nm²-km) aufweist; dadurch gekennzeichnet, dass die absolute Größenordnung der durchschnittlichen chromatischen Dispersion bei 1550 nm für einen Lichtwellenleiterabschnitt von wenigstens 2,2 km im Bereich von 2–8 ps/nm-km liegt.

Es folgen 4 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

FIG. 1

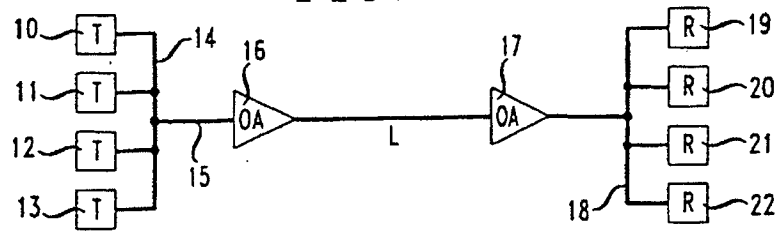


FIG. 2

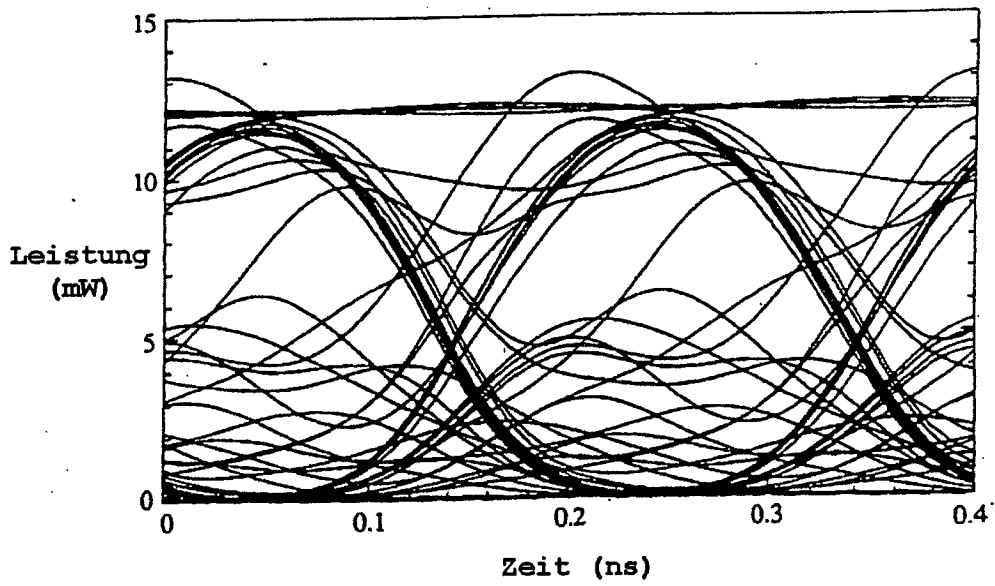


FIG. 3

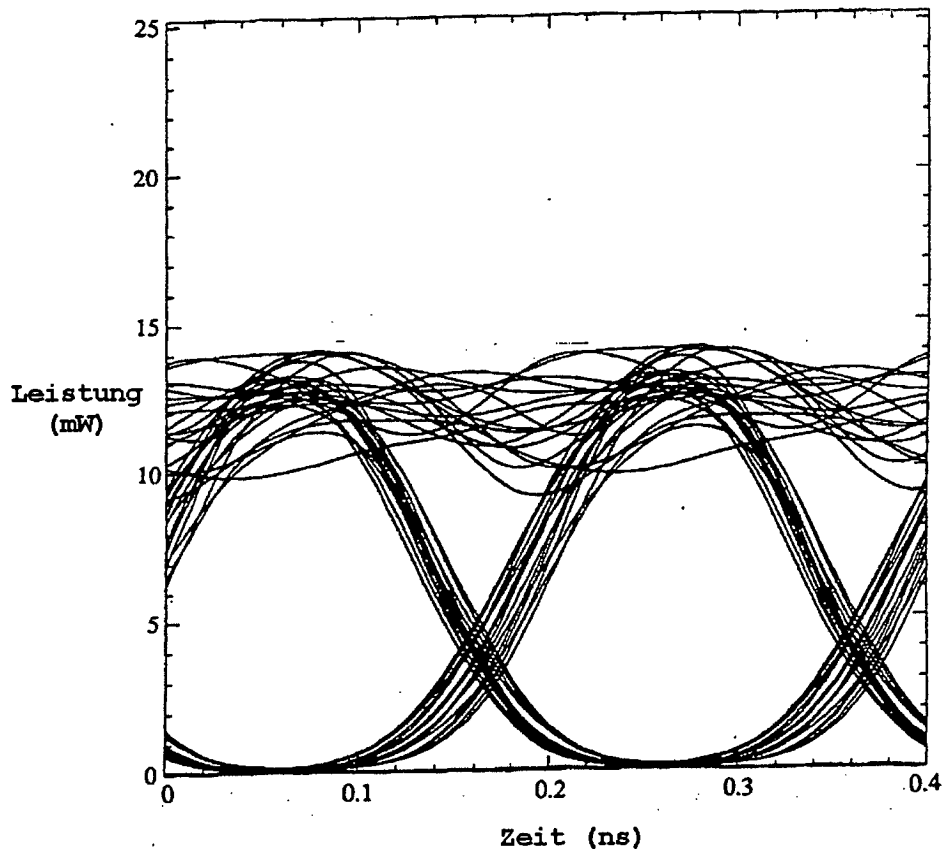


FIG. 4

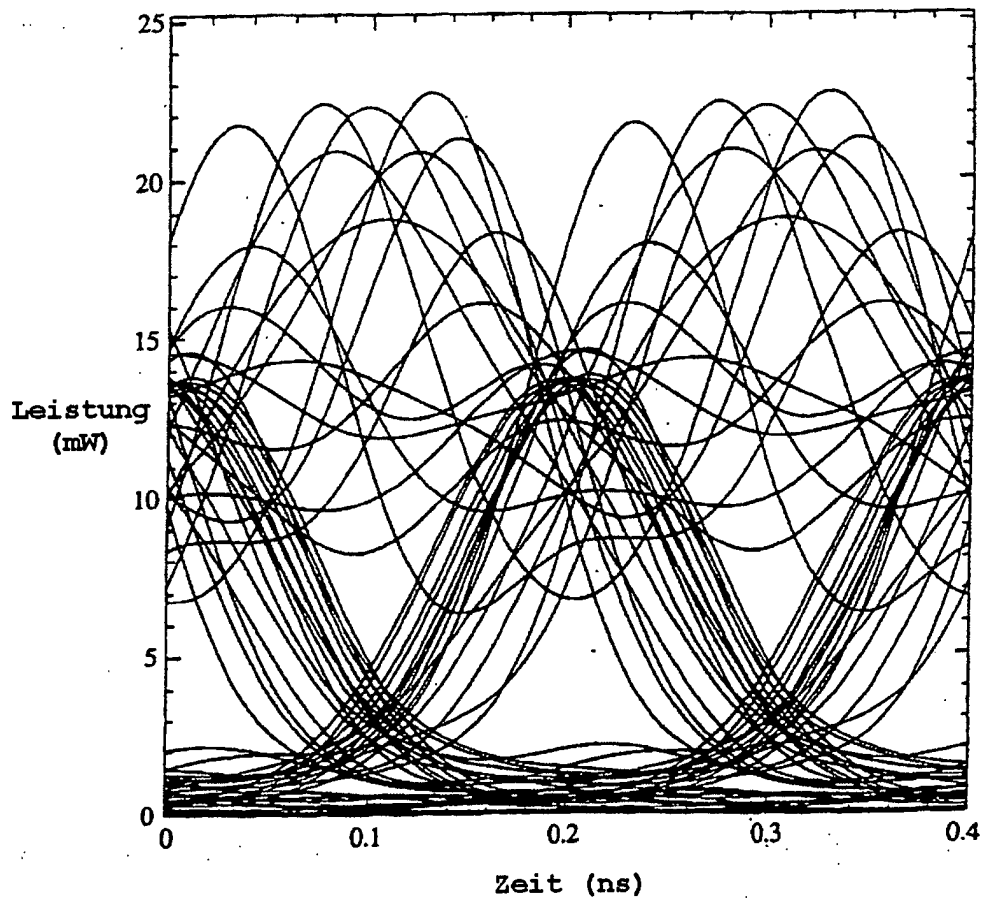


FIG. 5

